

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Goran Vuković

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc.dr.sc Krešimir Grilec

Goran Vuković

Zagreb, 2009.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Povjerenstvo za završne i diplomske radove
Studij STROJARSTVO
Inženjerstvo materijala



Zagreb, 24. studeni 2008.

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 17 - 06 - 2009	Prilog
Klasa: 602-04/09-6/3	
Ur.broj: 15-9703-09-186	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **GORAN VUKOVIĆ**

Mat. br.: 0035160372

Naslov: **EROZIJSKO TROŠENJE IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG TE
NAKNADNO SAČMAREN OG NODULARNOG LIJEVA**

Opis zadatka:

Toplinskom obradom izotermičkog poboljšavanja dobiva se izotermički poboljšani nodularni lijev čije su karakteristike odlična čvrstoća i dinamička izdržljivost. Sačmarenje je neabrazivni proces hladnog deformiranja površine materijala. Deformacija se ostvaruje mlazom čeličnih kuglica koje velikom brzinom udaraju u površinu. Posljedica sraza je stvaranje kratera jednoliko raspoređenih po površini, a dimenzije kratera i hrapavost površine ovise o promjeru kuglica i dinamici postupka. Lokalnom deformacijom se u površinu materijala unose tlačna naprezanja koja zaostaju u materijalu i sprečavaju stvaranje i porast inicijalnih pukotina, a time i lom materijala.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Ukratko opisati mehanizam erozije česticama
- 2) Opisati proces sačmarenja
- 3) Odrediti otpornost na erozijsko trošenje uzoraka izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva
- 4) Provesti prateća ispitivanja
- 5) Analizirati rezultate i dati zaključak

Zadatak zadan:

26. studenog 2008.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Krešimir Grilec

Referada za diplomske i završne ispite

Krajnji rok predaje rada:

Studeni 2009.

Predsjednik povjerenstva

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Obrazac PDS/DS - 3

SADRŽAJ

I POPIS SLIKA

II POPIS TABLICA I FORMULA

III POPIS OZNAKA I KRATICA

IV SAŽETAK

V IZJAVA

1.UVOD.....	1
1.1 CILJ TRIBOLOGIJE.....	1
1.2 MEHANIZMI TROŠENJA MATERIJALA.....	1
1.2.1 ADHEZIJA.....	2
1.2.2 ABRAZIJA.....	3
1.2.3 EROZIJA	4
1.2.4 TRIBOKOROZIJA.....	4
1.2.5 KAVITACIJA.....	5
1.2.6 UMOR MATERIJALA(PITTING).....	5
2. EROZIJA KRUTIM ČESTICAMA.....	6
3. NODULARNI LIJEV.....	12
3.1 DOBIVANJE NODULARNOG LIJEVA.....	13
3.2 TOPLINSKA OBRADA NODULARNOG LIJEVA.....	14
3.2.1 ŽARENJE ZA REDUKCIJU ZAOSTALIH NAPREZANJA.....	14
3.2.2 GRAFITIZACIJSKO ŽARENJE ZA REDUKCIJU CEMENTITA.....	14
3.2.3 GRAFITIZACIJSKO ŽARENJE ZA POSTIZANJE FERITNE STRUKTURE.....	14
3.2.4 NORMALIZACIJA.....	15
3.2.5 POBOLJŠAVANJE NODULARNOG LIJEVA.....	15
3.2.6 POVRŠINSKO KALJENJE.....	15
3.3 SVOJSTVA I VRSTE NODULARNOG LIJEVA.....	16
3.4 IZOTERMIČKI POBOLŠANI NODULARNI LIJEV.....	18
3.4.1 POSTUPAK IZOTERMIČKOG POBOLJŠAVANJA.....	20
3.4.2 MEHANIČKA SVOJSTVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA.....	23
3.4.3 PRIMJENA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA.....	27

4. PROCES SAČMARENJA-KUGLIČARENJA(SHOOT PEENING).....	28
4.1 KUGLIČARENJE.....	32
4.2 KONTROLA TIJEKA POSTUPKA KUGLIČARENJA.....	33
4.2.1 ALMEN METODA MJERENJA.....	35
4.3 SAČMARENJE (KUGLIČARENJE) ISPITIVANOG IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA.....	36
4.3.1 SVOJSTVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG I NAKNADNO SAČMARENOG NODULARNOG LIJEVA.....	37
5.EKSPERIMENTALNI DIO.....	37
5.1 IZOTERMIČKO POBOLJŠAVANJE NODULARNOG LIJEVA.....	37
5.2 KUGLIČARENJE.....	37
5.3 KEMIJSKA ANALIZA UZORAKA.....	38
5.4 METALOGRAFSKO ISPITIVANJE UZORAKA.....	40
5.4.1. PRIPREMA METALOGRAFSKIH UZORKA.....	40
5.5. ISPITIVANJE TVRDOĆE UZORAKA.....	46
5.5.1 ISPITIVANJE TVRDOĆE HRC METODOM.....	46
5.5.2 ISPITIVANJE MIKROTVRDOĆE HV0,2.....	48
5.6 ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA EROZIJSKO TROŠENJE.....	50
5.6.1 PARAMETRI ISPITIVANJA TROŠENJA EROZIJOM.....	52
5.6.2 REZULTATI ISPITIVANJA TROŠENJA EROZIJOM.....	54
5.6.3 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA EROZIJSKO TROŠENJE.....	57
6. ZAKLJUČAK.....	58
7. LITERATURA.....	59

I POPIS SLIKA

Slika 1- Adhezijsko trošenje

Slika 2- Abrazijsko trošenje

Slika 3- Abrazija između dva tijela

Slika 4- Abrazija između tri tijela

Slika 5- Erozijsko trošenje

Slika 6- Umor površine, pitting

Slika 7- Utjecaj kuta udara čestica na erozijsko trošenje duktilnog (Al) i
krhkog (staklo) materijala

Slika 8;Slika 9- Erozijska česticama na rotoru turbine

Slika 10- Procesi trošenja erozijom česticama

Slika 11- Sposobnost apsorpcije energije čestica za čelik i gumu (kvalitativno)

Slika 12- Grafitizacijsko žarenje za postizanje feritne strukture

Slika 13- Poboljšavanje nodularnog lijeva

Slika 14- Faze pri termičkoj obradi nodularnog lijeva

Slika 15- Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva

Slika 16- Shematski prikaz izotermičke pretvorbe austenita nodularnog lijeva

Slika 17- Usporedba mehaničkih svojstava standardnih kvaliteta nodularnog lijeva
i izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Slika 18- Utjecaj temperature izotermičke pretvorbe na mehanička svojstva
izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Slika 19- Gubitak mase nekoliko različitih izotermički poboljšanih nodularnih
lijevova i abrazivski otpornih čelika

Slika 20- Usporedba toplinske obrade, tj. potrošnje energije, prilikom
proizvodnje zupčanika izotermičkim poboljšavanjem i
klasičnim poboljšavanjem ili cementiranjem

Slika 21- Razdioba naprezanja na kugličarenom uzorku

Slika 22- Postupak sačmarenja

Slika 23- Postrojenje za sačmarenje

Slika 24-Almen metoda mjerenja

Slika 25- Utjecaj hladne deformacije(očvrsnuća) na savojnu dinamičku izdržljivost

Slika 26- T-t dijagram izotermičkog poboljšavanja

Slika 27- Spectrumat - 750 GDS Leco

Slika 28- Mikrostruktura uzorka u poliranom stanju, povećanje 100 x

Slika 29-Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 100x

Slika 30- Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 200x

Slika 31-Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 500x

Slika 33- Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 1000 x

Slika 33- Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 100 x

Slika 34- Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 200 x

Slika 35- Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 500 x

Slika 36- Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 1000 x

Slika 37- Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC i HRB metodi

Slika 38- Uzorak na kojem je ispitivana mikrotvrdoća

Slika 39- Mjerenje tvrdoće po VICKERS-u

Slika 40- Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju

Slika 41- Shema uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju

Slika 42– Unutrašnjost uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju

Slika 43-Vaga METLLER B5C 1000

Slika 44-Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska)

Slika 45-Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)

Slika 46- Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)

II POPIS TABLICA I FORMULA

POPIS TABLICA

Tablica 1- Vrste nodularnog lijeva i propisana mehanička svojstva prema raznim normama

Tablica 2-Parametri kugličarenja Al-slitine

Tablica 3-Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska)

Tablica 4-Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)

Tablica 5- Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)

Tablica 6. Analiza kemijskog sastava uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Tablica 7-Tvrdoća uzoraka

Tablica 8- Mikrotvrdoća po Vickers-u

POPIS FORMULA

(1)- Kritična brzina čestica ispod koje ne dolazi do plastične deformacije

(2)-Duljina dijagonale kod mjerenja mikrotvrdoće

(3)- Brzina vrtnje uzorka kod ispitivanja trošenja erozijom

III POPIS OZNAKA I KRATICA

POPIS OZNAKA

A	istezanje	%
F	sila	N
H	tvrdća materijala	-
HB	tvrdća po Brinell-u	HB
HRC	tvrdća po Rockwell-u	HRC
HV	tvrdća po Vickers-u	HV
J	parametar koji ovisi o modulu elastičnosti za ispitivani materijal i materijal čestica	
-		
K _{IC}	lomna žilavost	N/mm ^{3/2}
n	udarci	-
R _m	vlačna čvrstoća	N/mm ²
t	vrijeme	s
V _c	kritična brzina	m/s
V _p	brzina čestica	m/s
ΔV	istrošenje	mm ³
ΔV _g	granično istrošenje	mm ³
ΔL	produljenje	mm
θ	temperatura	°C
ρ	gustoća udarajućih čestica	kg/m ³
α _u	kut upada abraziva	°
θ _a	temperatura austentizacije	°C
θ _{iz}	temperatura izotermičkog poboljšavanja	°C

POPIS KRATICA

ADI izotermički poboljšan nodularni lijev

IV SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dva djela, teorijskog i eksperimentalnog. U teorijskom dijelu opisani su ciljevi tribologije, mehanizmi trošenja, nodularni lijev, izotermički poboljšani nodularni lijev i modificiranje površine izotermički poboljšanog nodularnog lijeva hladnom deformacijom-sačmarenjem.

U eksperimentalnom dijelu opisuje se ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje uzoraka izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva te analiza dobivenih rezultata.

V IZJAVA

Izjavljujem da sam rad radio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Krešimiru Grilecu na pomoći pri izradi rada.

Goran Vuković

1. Uvod

1.1 Cilj tribologije

Ispitivanje materijala prije upotrebe normalan je postupak koji se provodi vrlo često prilikom određivanja svojstava nekog materijala, te se nakon toga određuje je li taj materijal primjenjiv za upotrebu za koju je bio predviđen. Ispitivanje koje se provodi mora biti pravilno izvedeno da bi dobiveni rezultati bili točni i kasnije primjenjivi u praksi.

Trošenje materijala zbog erozije česticama je danas vrlo česta pojava te je svrha ovog istraživanja ispitivanje djelovanja čestica na erozijsku otpornost nodularnog lijeva u svrhu dobivanja njegovih svojstava. Nakon zavšetka ispitivanja analizirat će se dobiveni rezultati i na temelju tih rezultata donijeti zaključak o svojstvima izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva.

1.2 Mehanizmi trošenja materijala

Tribologija je znanost o trenju, trošenju i podmazivanju, dolazi od grčke riječi „tribos“ koja znači trenje, trošenje. Istraživanja na području tribologije usmjerena su na smanjivanje negativnih posljedica trenja i trošenja, koja se očituju u direktnim gubicima (energije, materijala) i indirektnim gubicima (zastoji, održavanje, pouzdanost, sigurnost, utjecaj na okoliš). Trošenje je progresivni gubitak materijala s radnih površina tijela, uslijed dinamičkog kontakta s drugim tijelom ili fluidom. Sustavi u kojima se pojavljuju procesi trošenja nazivaju se tribosustavi. Kad god se površine kreću jedna po drugoj, dolazi do pojave trošenja - oštećenja na jednoj ili obje površine koje najčešće podrazumijeva i progresivan gubitak materijala.

U većini slučajeva, trošenje je štetno; uzrokuje povećanu zračnost između pomičnih komponenti, neželjenu slobodu kretanja, gubitak preciznosti, često vibracije, povećano mehaničko opterećenje i još brže trošenje, te ponekad i umor materijala.

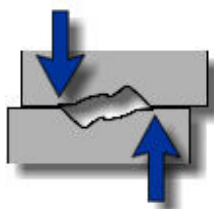
Gubitak relativno male količine materijala može biti dovoljan uzrok zatajenja rada velikih i kompleksnih strojeva. Ipak, ponekad su (kao kod trenja) velika trošenja poželjna - npr. brušenje, mljevenje i poliranje koriste pojavu trenja za brzo odstranjivanje materijala u kontroliranim uvjetima, a niska razina trenja ponekad je i poželjna kod nekih procesa uhodavanja mehanizma.

Trošenje se može podijeliti na trošenje klizanja, koje se javlja bez prisustva tvrdih čestica, i abrazijsko trošenje, koje se zbiva uz njihovo prisustvo. U određenim uvjetima trošenje klizanjem može proizvesti krhotine koje uzrokuju daljnje abrazijsko trošenje. Upravo zbog toga se treba imati na umu da granica između različitih vrsta trošenja često ne može biti jednoznačno određena.

Svi mehanizmi trošenja mogu se podijeliti u nekoliko skupina:

1.2.1 Adhezija

Adhezijsko trošenje nastaje kao posljedica djelovanja međumolekularnih sila u točkama dodira tijela, a manifestira se kroz „preraspodjelu“ materijala s jedne na suprotnu površinu.



Slika 1. Adhezijsko trošenje [1]

To često dovodi do puknuća i hladnog zavarivanja radnih dijelova. Adhezijsko trošenje se reducira korištenjem različitih materijala i tvrdih površina otpornih na ovu vrstu trošenja.

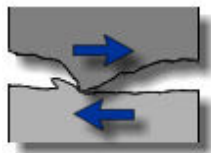
1.2.2 Abrazija

To je najučestalije trošenje u industriji. Nastaje kao posljedica prodiranja vrhova tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg uz brazdanje pri uzajamnom gibanju tijela.



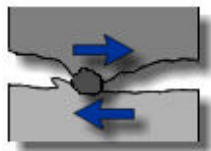
Slika 2. Abrazijsko trošenje [1]

Abrazivno sredstvo može biti proizvod tipa: ugljen, cement, kamen, staklo, keramika i sl. Trošenje se stoga javlja prilikom kopanja rudače, drobljenja, izvlačenja i otpremanja. Strojni dijelovi su tada izloženi visokim naprezanjima i tzv. abraziji između dva tijela (Two-Body Abrasion). Borba protiv ove vrste trošenja zahtijeva vrlo tvrde, guste i otporne materijale za površinsku zaštitu.



Slika 3. Abrazija između dva tijela [1]

Abrazija između tri tijela (Three- Body Abrasion) javlja se kod uređaja kao što su pumpe ili ventili kada se abrazivno sredstvo zaglavi između površina u trenju (npr. ležajevi). I ovdje se zbog visokih naprezanja moraju koristiti čvrsti i otporni materijali.



Slika 4. Abrazija između tri tijela [1]

Osnovna razlika između ove dvije vrste abrazijskog trošenja je u tome što abrazija između dva tijela nastaje isključivo zbog tvrdih izbočina na površinama u dodiru, dok se kod abrazije između tri tijela radi o dvije površine između kojih se tvrde abrazivne čestice slobodno kreću i uzrokuju oštećenja.

Neki od načini smanjenja abrazijskog trošenja su:

- izbor parova materijala otpornih na abrazijsko trošenje
- odgovarajuća obrada površinskih slojeva
- razdvajanje površina slojem fluida- maziva.

1.2.3 Erozijska

Ova vrsta trošenja nastaje uslijed djelovanja djelića fluida (sa ili bez krutih čestica nošenih fluidom) koji velikim brzinama udaraju o površinu tijela.



Slika 5. Erozijsko trošenje [1]

Jačina erozije najvećim dijelom ovisi o brzini i kutu udara čestica, te njihovoj tvrdoći.

Postoje dva osnovna oblika erozije:

- a) Udarne erozija (erozija oštrog kuta) proces koji sliči abraziji i rezanju. Kako bi se smanjila količina trošenja, potrebna je velika tvrdoća same površine.
- b) Abrazivna erozija (erozija tupog kuta) gdje se većina energije troši na deformaciju površine. Zaštita od ove vrste trošenja zahtijeva elastični zaštitni sloj, najčešće elastomer.

Neki od načini smanjenja erozijskog trošenja su:

- eliminacija krutih čestica iz fluida
- promjena kuta udara fluida o površinu
- smanjenje relativne brzine fluida
- izbor pogodnog materijala
- dodatne izmjene površine materijala u cilju poboljšanja njegovih karakteristika.

1.2.4 Tribokorozija

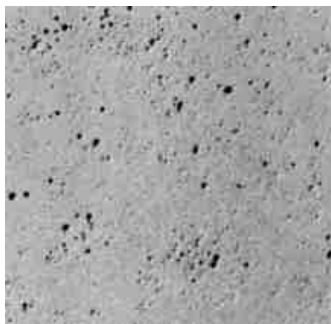
Javlja se u slučajevima kada se pojavi adhezijsko ili abrazijsko trošenje u kombinaciji s korozivnim okruženjem. Stupanj gubitka materijala može biti veoma visoka. Uzrok tomu leži u činjenici da se premazi za zaštitu od korozije lako odstranjuju trošenjem ostavljajući tako nezaštićen metal koji brzo korodira. Stabilni sloj oksida koji bi spriječio napredovanje korozije se gubi uslijed adhezijskog/abrazijskog trošenja. Sama korozija je elektrolitički proces koji uključuje izmjenu elektrona i iona. Može se pojaviti između različitih metala ili između različitih dijelova istog metala ili slitine gdje postoji razlika elektrokemijskog potencijala. Razlika nastaje i zbog prisustva oksida, različitih nečistoća, faza slitine. Za koroziju je potreban i provodljivi elektrolit (vlaga, slana voda, i sl.) za uspostavljanje električnog kruga.

1.2.5 Kavitacija

Kavitacijsko trošenje je ustvari podvrsta erozijskog trošenja. Javlja se kada se tlak u tekućini snizi na vrijednost tlaka isparavanja te dolazi do pojave mjehurića pare. Oni bivaju nošeni u područje višeg tlaka gdje implodiraju (vraćaju se u kapljevitu fazu). Ako se implozija mjehurića pare dešava u blizini čvrste stijenke, dolazi do njenog oštećenja. Sama pojava popraćena je vibracijama i bukom.

1.2.6 Umor materijala(pitting)

Umor površine je odvajanje čestica uslijed cikličkih promjena naprezanja, te je jako opasan mehanizam trošenja. Razlog tome leži u činjenici da se prva faza nastajanja pukotina odvija ispod površine, gdje je nevidljiva. Pokazatelj će biti moguće uočiti tek u drugoj fazi kada pukotina izlazi na površinu, te iz nje počinju izlaziti malene kuglice, dok je treća faza konačna faza u kojoj dolazi do ispadanja krupnih čestica materijala u obliku ivera.

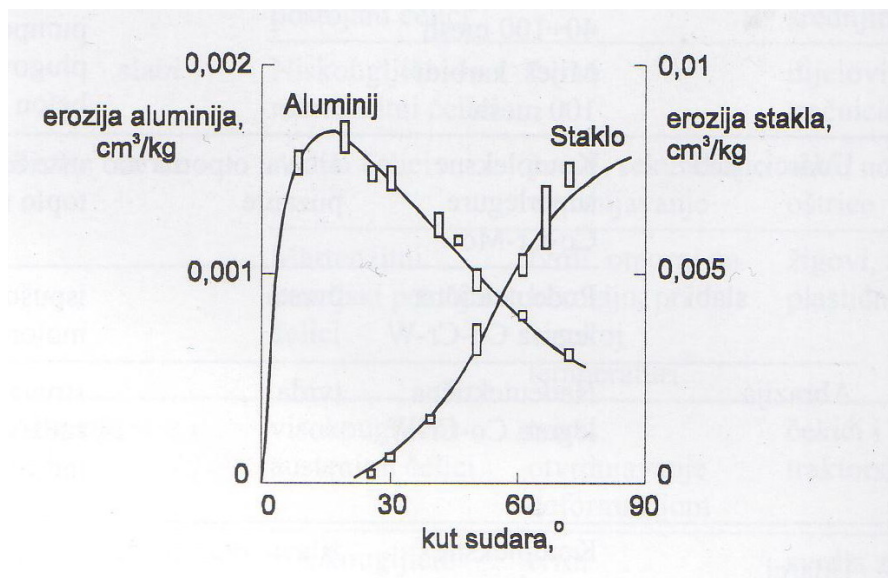


Slika 6. Umor površine, pitting [1]

U određenom slučaju trošenja, mogu biti zastupljeni svaki od ovih mehanizama, ovisno o uvjetima.

2. Erozija krutim česticama

Erozija krutim česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela tijekom učestalih udara krutih čestica. Erozijska prilikom udara krutih čestica pod malim kutom u odnosu na površinu naziva se abrazivna erozija, a kad čestice udaraju u površinu gotovo okomito udarna erozija. Kada se govori o eroziji ovisno o kutu udara čestica, javljaju se dva mehanizma trošenja, abrazija i umor površine koji su podjednako opasni, te su prikazani na slici 7.



Slika 7. Utjecaj kuta udara čestica na erozijsko trošenje duktilnog (Al) i krhkog (staklo) materijala. [2]

Erozija krutim česticama je ujedno i jedan od glavnih razloga oštećenja na lopaticama turbina prilikom čega se materijal turbine jednostavno pretvara u prah, te nastaju rupe i utori u osnovnom materijalu, kako je prikazano na slikama 8 i 9.



Slika 8. Erozija krutim česticama na rotoru turbine [2]



Slika 9. Erozija krutim česticama na rotoru turbine [2]

Tijekom udara čestica, kada je granica razvlačenja premašena, dolazi do plastične deformacije u blizini zone udara. Nakon višestrukih udara plastično deformirani sloj površine se može stvoriti u blizini erodirane površine pa se zbog toga granica razvlačenja povećava radi očvršćivanja deformacijom. Tijekom daljnje deformacije, granica razvlačenja na površini materijala će na kraju postati jednaka udarnoj žilavosti, te neće doći do daljnje plastične deformacije. U tom trenutku površina materijala postaje krhka te se njezini fragmenti mogu ukloniti naknadnim udarima. Prilikom erozije gubitak materijala s metalne površine događa se kada je kritična lomna deformacija postignuta na površini. Kritična lomna deformacija može biti postignuta nakon jednog ili višestrukih udara erodivnih krutih čestica. Prilikom gubitka materijala nakon dostignuća kritične deformacije, materijal ispod površine se još uvijek plastično deformira. Predloženo je ako se želi konstruirati materijal koji će biti otporan na eroziju da se pažnja mora posvetiti takvoj mikrostrukтури da idealno nikad ne akumulira kritičnu deformaciju prijeloma prilikom naprezanja koje stvaraju udarajuće čestice. Stoga mogućnost materijala da apsorbira energiju koja se stvara prilikom udara krutim česticama može pridonosti njegovoj erozijskoj otpornosti. Provedene su mnoge studije utvrđivanja i utjecaja mehaničkih svojstava, kemijskog sastava i mikrostrukture raznovrsnih materijala na njihovu erozijsku otpornost. Međutim dobra ovisnost između tih parametara utvrđena je samo za neke materijale. Utvrđujući utjecaj mehaničkih karakteristika na erozijsku otpornost, mikrostrukura dane legure može biti optimirana da omogući kombinaciju najboljih mehaničkih karakteristika za poboljšanu otpornost na eroziju. Tvrdća je najraširenije svojstvo koje je usko povezano s erozijskom otpornosti materijala. Međutim neka druga istraživanja su pokazala da stupanj erozije nije ovisan o tvrdoći materijala. Utjecaj tvrdoće na erozijsku otpornost je usko povezan sa svojstvima erozivnih čestica i uvjetima erozijskih ispitivanja (brzina, oblik, veličina i gustoća čestica). Kad tvrde čestice pod kutem udaraju na relativno mekanu površinu dolazi do plastične deformacije površine. S druge strane, kad se koriste čestice male tvrdoće, mogu se oštetiti. U tom slučaju šteta nastala udarom čestica će se smanjivati kako se tvrdoća materijala povećava. Na primjer, ustanovljeno je da je kritična brzina čestica ispod koje ne dolazi do plastične deformacije proporcionalna tvrdoći materijala,[2].

Odnos je dan sa sljedećom jednačbom, [2]

$$V_c = 4.3 \times H^{2,5} \times J \times^2 \times \rho^{-0,5} \quad (1)$$

gdje je:

V_c = kritična brzina

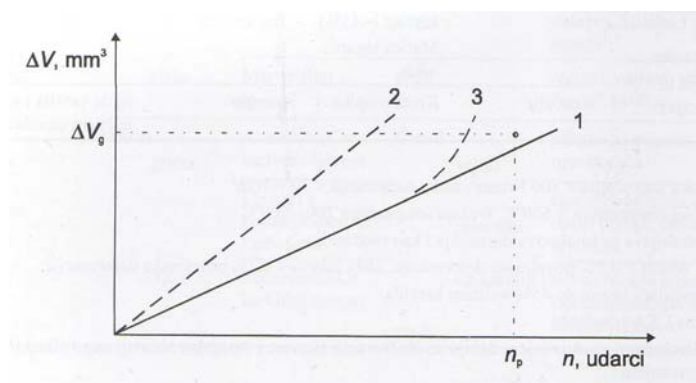
H = tvrdoća materijala

J = parametar koji ovisi o modulu elastičnosti za ispitivani materijal i materijal čestica

ρ = gustoća udarajućih čestica

Prema toj jednačbi može se pretpostaviti da pri maloj brzini čestica ($V_p < V_c$), materijali s visokim stupnjem tvrdoće nude bolju erozijsku otpornost jer udarajuće čestice uzrokuju plastičnu deformaciju i/ili pucanje površine materijala. Međutim kod velike brzine čestica ($V_p > V_c$), kad su plastična deformacija i/ili pucanje površine materijala uobičajeni, tvrdoća ne može povećati erozijsku otpornost materijala. Unatoč mnogim pokušajima da se pronađe ovisnost tvrdoće i erozijske otpornosti raznih legura nije pronađena nikakva primjerena kvantitativna veza. Jasno je da utjecaj tvrdoće na erozijsku otpornost mora biti promatran u skladu sa svojstvima erozivnih čestica (veličina, oblik i gustoća) i uvjeta erozijskih testova (brzina, temperatura i kut upada), [2].

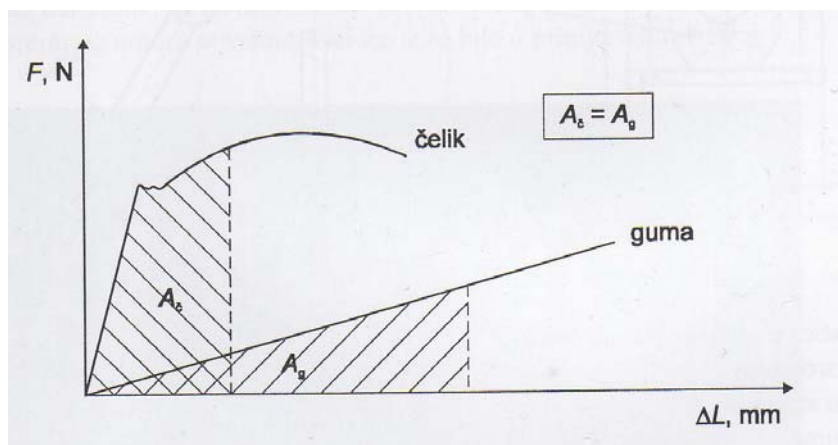
Pri eroziji krutim česticama moguće su promjene iznosa trošenja koje su prikazane na slici 10.



Slika 10. Procesi trošenja erozijom česticama [2]

Na prikazanoj slici 10. pravac 1 predstavlja „normalni“ proces trošenja erozijom krutim česticama neovisno da li se radi o abrazijskom mehanizmu ili o umoru površine. Pravac 2 prikazuje slučaj kada je abrazija izraženija nego što je to predviđeno, krivulja 3 predstavlja slučaj preranog umora površine.

Glavna mjera koja se koristi u tribologiji za izbjegavanje nepovoljnih procesa trošenja erozijom krutim česticama je izbor materijala odnosno zaštitnih slojeva otpornih na eroziju česticama. Kut pod kojim čestice upadaju može biti malen (do 30°) te onda dolazi do abrazije ili može bit velik (60° do 90°) pa to nazivamo udarno trošenje. U oba navedena slučaja, zbog disipacije energije čestica do izražaja dolaze i elastična svojstva materijala, odnosno sposobnost čestica da to absorbiraju elastičnom deformacijom, radije nego plastičnom deformacijom odnosno lomom što je prikazano na slici 11, [2].



Slika 11. Sposobnost apsorpcije energije čestica za čelik i gumu (kvalitativno) [2]

Na brzinu erozije česticama utječe:

a) Kut udara čestica - Kut udara α je definiran kao kut između erodiranog materijala i trajektorije erodivnih čestica. Ovisnost brzine erozije o kutu udara je značajno određeno vrstom erodiranog materijala. Dokazano je da duktilni materijali, kao metali i legure, postižu najveći stupanj erodivnosti za manje kuteve, npr 15° , 30° . Za razliku od njih, krhki materijali kao npr. staklo, keramika, najveće vrijednosti postižu za normalni kut, tj oko 90° .

b) Veličina čestica - Također, utjecaj ima i veličina čestica. Brzina erozije raste proporcionalno s povećanjem veličine čestica. No, ova zakonitost vrijedi samo do određene vrijednosti (50 do $100\mu\text{m}$), nakon koje brzina erozije prestaje biti ovisna o veličini čestice.

c) Oblik erozivnih čestica - Na međuzavisnost brzine erozije i kuta udara čestica također utječe sam oblik čestice. Naime, čak i kod duktilnih materijala pod normalnim kutem udara, najveća erozija će biti prisutna kod nepravilnog oblika čestica.

d) Temperatura - Pri eroziji česticama, jako bitan uvjet je temperatura okoline u kojoj se proces događa. Pripadajuća ovisnost može se podijeliti u 3 grupe. U prvoj grupi, brzina erozije pada s porastom temperature, doseže minimum, te zatim raste s povišenjem temperature. Druga skupina materijala pokazuje neosjetljivost na porast temperature, sve dok temperatura ne dostigne kritičnu vrijednost. Nakon toga, brzina erozije raste s porastom temperature. Treća skupina materijala pokazuje svojstvo konstantnog porasta brzine erozije s porastom temperature.

3. Nodularni lijev

Lijevano željezo se proizvodi iz sirovog željeza, starog lijevanog željeza i starog čelika. Lijevano željezo je legura željeza, ugljika i silicija, koja tipično sadrži od 2 do 4 % C i 0,5 do 3 % Si i manje količine mangana, fosfora i sumpora. Za lijevano željezo je karakteristično da se veće količine ugljika nalaze u njegovoj strukturi kao čisti ugljik ili grafit.

Definicija glasi da je nodularni lijev ljevačka pseudobinarna legura koja se sastoji od željeza i ugljika, pri čemu se ugljik pretežnim dijelom izlučio u kuglastom obliku. Prvi se naziv odnosi na specifični kuglasti oblik u kojem se izlučio grafit dok se drugi odnosi na svojstva žilavosti. Karakterizira ga visok udio ugljika 2 do 4%. Ako se sivi lijev s oko 1% Si, jako pregrije u rastaljenom stanju i naglo ohladi stvara se grafit kuglastog oblika. Proizvodnja nodularnog lijeva započela je nakon 1940. te neprekidno raste u svim industrijskim zemljama. Istraživanja su pokazala da se kuglasti grafit može postići i legiranjem (cijepljenjem) i to: podeutektičkog sivog lijeva s oko 0,5% Mg (magnezij), a nadeutektičkog sivog lijeva s oko 0,5% Ce (cerij), gdje su Mg i Ce elementi globulatori. Ostali elementi moraju biti u što manjoj količini tzv. antiglobulatori. To su elementi koji sprečavaju izlučivanje grafita u obliku kuglica, a to su: Al, As, Bi, Cd, Pb, Sb, Sn, Te, Ti, Zn. Legiranjem se postižu poboljšana mehanička svojstva: povišena vlačna čvrstoća R_m (u odnosu na sivi lijev), znatno povišeno lomno istezanje ($A, \%$) (u odnosu na sivi lijev). Globulatori se u talinu dodaju tik prije lijevanja. Zasip od specijalnog sivog sirovog željeza tali se u elektropeći, a taljevina se obrađuje elementima globulatorima (oko 0,5% Mg kod podeutektičkih vrsta i oko 0,5% Ce kod eutektičkih vrsta) koji pomažu izlučivanje grafita u obliku kuglica (nodula). Taljevina se zatim ulijeva u pješčane kalupe. Ovaj je postupak dobivanja složeniji i skuplji nego za ostale ljevove.

Metalna osnova u lijevanom stanju može biti monofazna: feritna, perlitna te dvofazna feritno-perlitna. Legiranjem ili toplinskom obradom mogu se postići i druge strukture. Nodularni lijev je materijal koji osvaja tržište i zamjenjuje druge ljevove na bazi željeza. Nodularni lijev ima mnogo veću čvrstoću nego sivi lijev, ali mu nedostaje sposobnost prigušivanja vibracija i obradivost sivog lijeva. Mehanička svojstva su mu između čeličnog i sivog lijeva: bolje se obrađuje od čelika, ima bolju sposobnost prigušivanja i bolja ljevačka svojstva od čelika. Posebna prednost nodularnog lijeva prema sivom i nelegiranom čeliku je veličina granice razvlačenja, [3].

3.1. Dobivanje nodularnog lijeva

Nodularni lijev se dobiva dodavanjem magnezija u rastaljeno ljevano željezo, koje sadrži relativno visoki sadržaj ugljika. Magnezij uzrokuje kristalizaciju grafita u obliku kuglica. Nekoliko je koraka je potrebno da se proizvede ovaj lijev,[3]:

1. Desumporizacija - sumpor uzrokuje rast grafita u listićima. Ljevovi s malom količinom sumpora se dobivaju topljenjem u pećima, koje odstranjuju sumpor ili miješanjem željeza sa sredstvima, koje odstranjuju sumpor (kalcijev karbid).
2. Nodulizacija - magnezij koji se dodaje odstranjuje sumpor i kisik i uzrokuje rast kuglastih grafita.
3. Inokulacija – vrši se s FeSi legurama.

3.2 Toplinska obrada nodularnog lijeva

3.2.1. Žarenje za redukciju zaostalih naprežanja

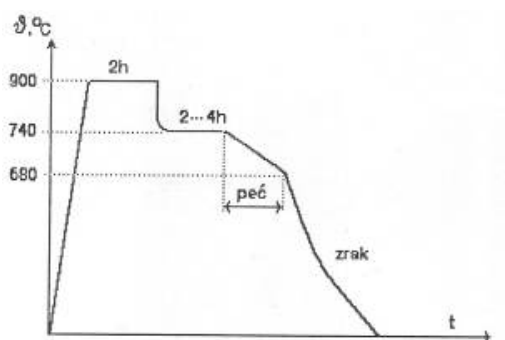
Prilikom žarenja odljevci se zagrijevaju na temperaturu od oko 550°C i drže na toj temperaturi 2-4 sata. Nakon toga se odljevci hlade u peći. Tim postupkom se reducira 80-90% napetosti.

3.2.2. Grafitizacijsko žarenje za redukciju slobodnog cementita

Takvo žarenje se prvobitno upotrebljava zbog eliminacije $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{slob.}}$. Pri tome struktura ostaje feritno-perlitna te se poboljšavaju plastična svojstva materijala i obradivost odvajanjem čestica.

3.2.3. Grafititacijsko žarenje za postizanje feritne strukture

Grafitizacijskim žarenjem za postizanje feritne strukture raste produljenje nakon kidanja i žilavost, a snižava se vlačna čvrstoća i otpornost na trošenje, te se poboljšava obradivost odvajanjem čestica.



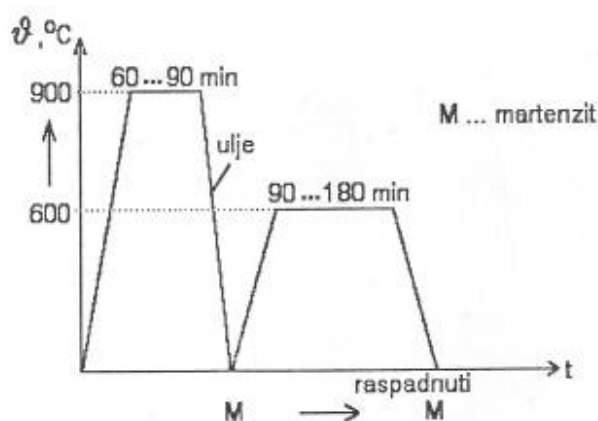
Slika 12. Grafitizacijsko žarenje za postizanje feritne strukture, [3]

3.2.4. Normalizacija

Normalizacijom se postiže rast granice razvlačenja $R_{p0,2}$ za oko 40%, te rast otpornosti na trošenje.

3.2.5. Poboljšavanje nodularnog lijeva

Ukratko poboljšavanjem se postiže visoka tvrdoća (HRC), otpornost na trošenje, visoka čvrstoća (R_m), granica razvlačenja ($R_{p0,2}$), te povišena žilavost (KU)



Slika 13. Poboljšavanje nodularnog lijeva, [3]

3.2.6. Površinsko kaljenje

Površinsko kaljenje se izvodi na temperaturama od 950 do 1100°C, a gasi se u vodi ili ulju. Kaljenje može plinsko ili indukcijско. Površinskim kaljenjem se dobije martenzitna struktura površine, dok struktura jezgre ostaje feritno-perlitna. Kaljenje se provodi samo ako se zahtjeva otpornost na trošenje, tvrda površina i žilava jezgra.

3.3 Svojstva i vrste nodularnog lijeva

Nodularni lijev se može djelomično čak i toplo oblikovati (valjati, kovati itd.), a svojstva su između svojstva čeličnog i sivog lijeva. Bitno je naglasiti da je grafit kuglastog oblika, a kugla ima najmanju ploštinu pri konstantnom volumenu. Zato je smanjenje nosivosti presjeka radi grafita kuglastog nodularnog lijeva manje nego u sivom lijevu, a nema ni zareznog djelovanja listića grafita.

Približni kemijski sastav nodularnog lijeva iznosi:

- Ugljik 3.3 do 3.4%
- Silicij 2.2 do 2.8%
- Mangan 0.1 do 0.5%
- Sumpor 0.005 do 0.02%
- Fosfor 0.005 do 0.04%
- Magnezij 0.03 do 0.05%
- Željezo (ostatak)

Mangan djeluje cementatorski, a ne treba ga jer je postotak sumpora nizak, dok fosfor djeluje loše na žilavost i produljenje nakon kidanja, a obradljivost čestica kod nodularnog lijeva je dobra. Mehanička svojstva su bolja nego kod sivog lijeva, a slabija nego kod čeličnog lijeva. Postižu se povoljnim kemijskim sastavom, pažljivom kontrolom tehnološkog postupka i dobro odabranom i vođenom toplinskom obradom. Mogu se povisiti klasičnim poboljšavanjem i površinskim kaljenjem ako se zadovolje uvjeti kaljivosti. Zbog kuglastog oblika grafita visoka je dinamička izdržljivost i vlačna čvrstoća posebno u poboljšanom stanju. Povišena žilavost se može dobiti izotermičkim poboljšavanjem. Visok je i modul elastičnosti – oko 180 000 N/mm², u odnosu na sivi lijev, sposobnost prigušenja vibracija je oko dva puta niža nego kod sivog lijeva, može se zavarivati. Nodularni lijev ima i dobra ležišna svojstva te otpornost na trošenje, koroziju i oksidaciju. Legiranjem se postižu posebna svojstva npr. otpornost na djelovanje agresivnih medija,[3]

Tablica 1. Vrste nodularnog lijeva i propisana mehanička svojstva prema raznim normama [4]

OZNAKA			VLAČNA ČVRSTOĆA R _m N/mm ²	GRANICA RAZVLAČ. R _{p0,2} N/mm ²	ISTEZANJE %	TVRDOĆA HB	STRUKTURA
EN-GJS	DIN	HRN					
EN-GJS-400	GGG 40	NL 40	400 -550	250-350	15 -27	135-185	ferita
EN-GJS-500	GGG 50	NL 50	500 -650	320-420	7 -18	170 -220	Feritno-perlitna
EN-GJS-600	GGG 60	NL 60	600- 750	380-480	3 - 8	200 -250	Perlitno-ferina
EN-GJS-700	GGG 70	NL 70	700-850	440-600	2-6	235 -285	perlitna

Osnovne vrste nodularnog lijeva po strukturi su:

- feritni
- feritno-perlitni
- perlitni
- austenitni

Feritni nodularni lijev ima nižu čvrstoću, ali višu istezljivost dok je kod perlitnog nodularnog lijeva obratno. Perlitni nodularni lijev predstavlja najbolji izbor u mnogobrojnim slučajevima primjene. Ako su odljevci izloženi deformacijama i udarnim opterećenjima predlaže se feritni nodularni lijev.

Najekonomičnija i najkonkurentnija struktura je feritno - perlitna struktura nodularnog lijeva jer uz veliku čvrstoću ima i dobru otpornost prema trošenju. Toplinskom obradom i legiranjem mogu se proizvesti vrste nodularnog lijeva vrlo velike čvrstoće. [3]

3.4 Izotermički poboljšani nodularni lijev

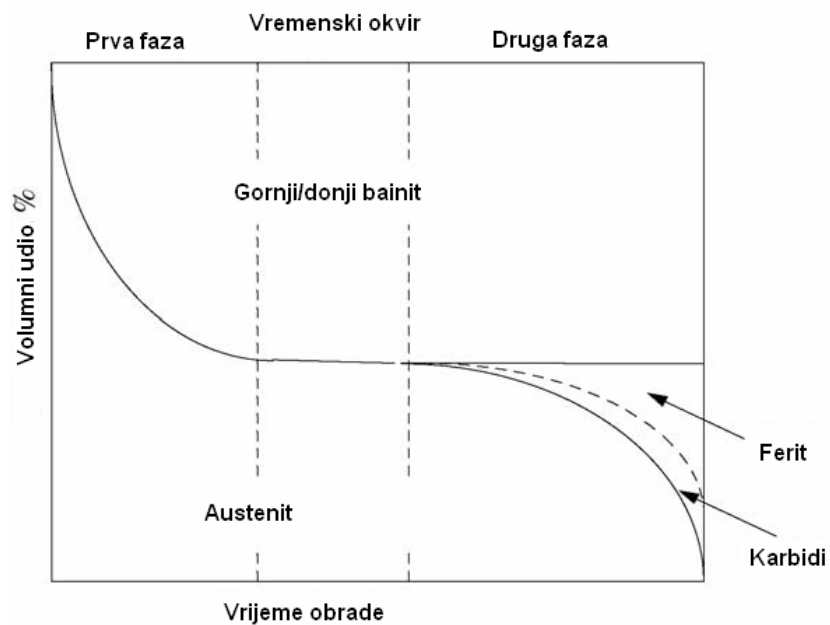
Izotermički poboljšani nodularni lijev (eng. Austempered Ductile Iron - ADI) spada u grupu toplinski tretiranih željeznih ljevova koji su poznati pod ASTM 897M and EN1564 standardnim normama.

Izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva spada u skupinu postupaka kojima se mijenja struktura cijelog volumena, a provodi se u cilju povišenja mehaničkih svojstava odljevaka (čvrstoće, istezljivosti, žilavosti, dinamičke izdržljivosti itd.).

Izotermičkim poboljšavanjem postižu se znatno bolja svojstva kako u odnosu na lijevano tako i u odnosu na klasično poboljšano stanje. Dok je čvrstoća uobičajenih nodularnih ljevova od 400 do 800 N/mm², čvrstoća izotermički poboljšanog nodularnog lijeva može doseći 1400 N/mm². Unatoč tako visokoj čvrstoći, izotermički poboljšani nodularni lijev ima razmjerno visoke vrijednosti istezljivosti, dinamičke izdržljivosti i žilavosti. Zato se ovaj materijal danas često upotrebljava u industriji motora, motornih vozila, poljoprivrednih i građevinskih strojeva. Također se koristi kao zamjena za čelične otkovke, odljevke, dijelove od valjanih profila. Primjenom izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ostvaruju se značajne uštede.

Nodularni lijev podvrgnut izotermičkoj obradi u cilju postizanja bainitne mikrostrukture naziva se izotermički nodularni lijev. Toplinska obrada se provodi u dva koraka. Prvo, nodularni lijev se austenitizira na temperaturu od oko 850–950 °C u cilju mijenjanja strukture matrice u austenitnu. Pri tome je sadržaj ugljika kontroliran temperaturom austenitizacije te kemijskim sastavom. Drugi korak je hlađenje na temperaturu od 250–450 °C, na kojoj se drži određeno vrijeme tijekom kojega bainit raste izotermički prije hlađenja na sobnu temperaturu. U prvom koraku ovaj proces proizvodi visokougljičnu austenitnu matricu s feritom. Kritični parametar pri obradi je vrijeme austenitizacije koje bi trebalo trajati unutar vremenskog okvira, nakon koje se zaostali austenit raspada na ferit i karbide tijekom druge faze procesa, [3].

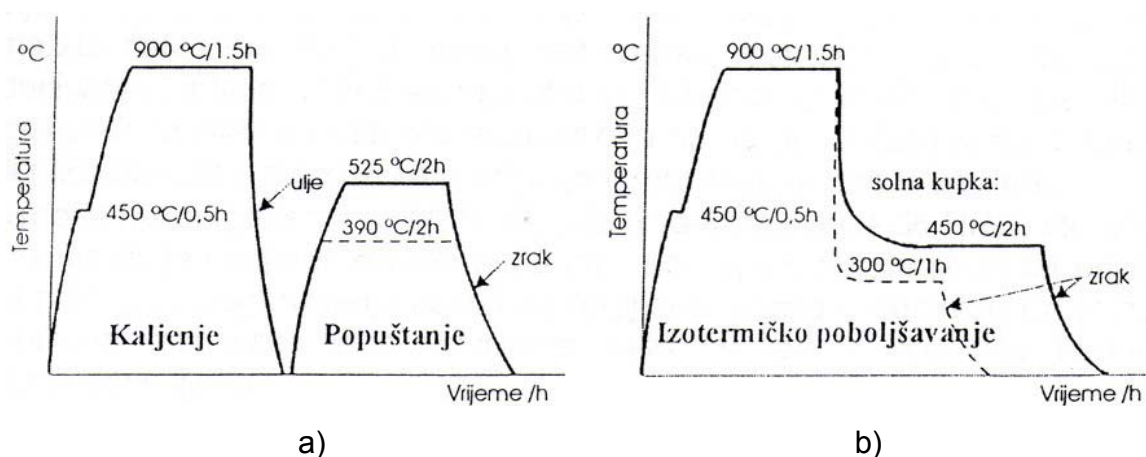
S odličnom kombinacijom čvrstoće i žilavosti, izotermički obrađeni nodularni lijev se nametnuo kao nezaobilazan materijal u mnogim područjima primjene, posebice u područjima gdje su strojni dijelovi izloženi erozijskom trošenju



Slika 14. Faze pri termičkoj obradi nodularnog lijeva [5]

3.4.1 Postupak izotermičkog poboljšavanja

Za razliku od uobičajenog (klasičnog) poboljšavanja, kod izotermičkog poboljšavanja poboljšava se austenitizirani nodularni lijev te se naglo ohlađuje na temperaturu izotermičke pretvorbe, (u područje stvaranja bainita), drži dovoljno dugo i nakon toga ohlađuje (najčešće na zraku) do sobne temperature. Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva prikazan je na slici 15.



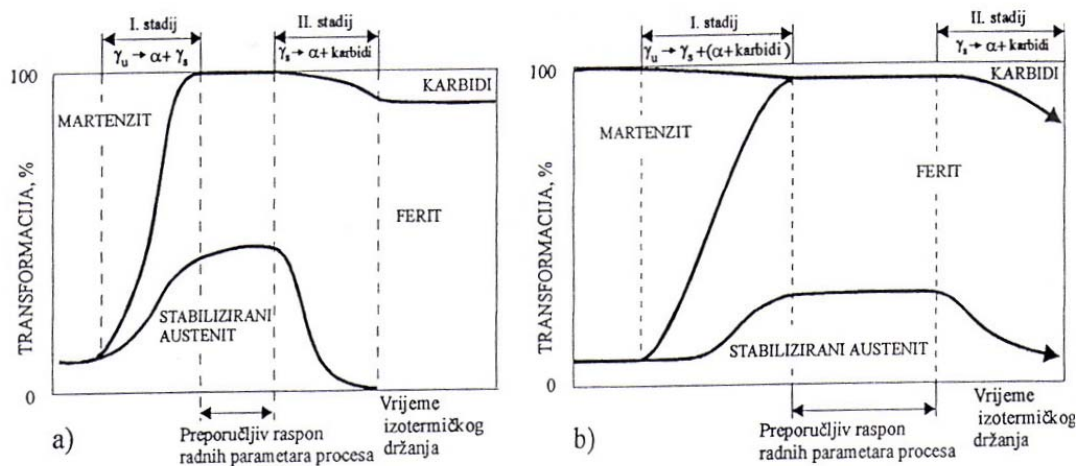
Slika 15. Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva,[6]:

- (a) – dijagram postupka poboljšavanja;
- (b) – dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja,

Austenitizaciju treba provesti (ovisno o vrsti i kemijskom sastavu nodularnog lijeva) pri dovoljno visokoj temperaturi (od 850 do 950 °C) razmjerno dugo (oko 90 min) da se otopi što više ugljika u austenitu.

Ovisno o visini izotermičke pretvorbe (ϑ_{iz}) postići će se osnovna mikrostruktura gornjeg bainita (ako je ϑ_{iz} viša) ili mikrostruktura donjeg bainita (ako je ϑ_{iz} niža) što će rezultirati i različitim svojstvima.

Izotermička pretvorba austenita kod nodularnog lijeva razlikuje se od one kod čelika. Kod izotermičkog poboljšavanja izlučuje se bainitni ferit iz austenita i koji urasta u austenit. Istovremeno izdvaja se ugljik iz rastućih feritnih listića u austenit. Pretvorba austenita kod nodularnog lijeva odvija se u dva stadija. Slika 16 prikazuje shematski strukturne transformacije pri izotermičkom poboljšavanju nelegiranog nodularnog lijeva i to za višu i nižu temperaturu izotermičke pretvorbe. U I. stadiju pri višoj ϑ_{iz} (slika 16 a) najprije nastaje i raste bainitni ferit i to na granicama austenita ili u blizini grafitnih nodula. Visoki sadržaj Si u nodularnom lijevu sprečava nastajanje karbida (koji je normalno sastavni dio bainitne reakcije), te se zbog toga preostali austenit obogaćuje ugljikom. Nakon nekog vremena austenit je toliko obogaćen ugljikom (do 2%) da postaje stabilan sve do temperatura ispod sobne. Kako se austenit obogaćuje ugljikom, on sprečava rast bainitnog ferita i reakcija će stati. Ova transformacija austenita u bainitni ferit i ugljikom obogaćeni austenit poznata je kao reakcija I. stadija. Po završetku I. stadija austenit je dovoljno stabiliziran da se ne može transformirati u martenzit hlađenjem do sobne temperature.



Slika 16 – Shematski prikaz izotermičke pretvorbe austenita nodularnog lijeva na višoj (a) i nižoj (b) temperaturi izotermičke pretvorbe, [7]

Nešto su drugačija zbivanja (u I. stadiju) u slučaju pretvorbe austenita pri nižoj temperaturi (ϑ_{iz}). Zbog slabije difuzije ugljika dolazi do nastanka vrlo fine mikrostrukture bainitnog ferita s precipitiranim karbidima i stabiliziranog austenita, slika 16 b.

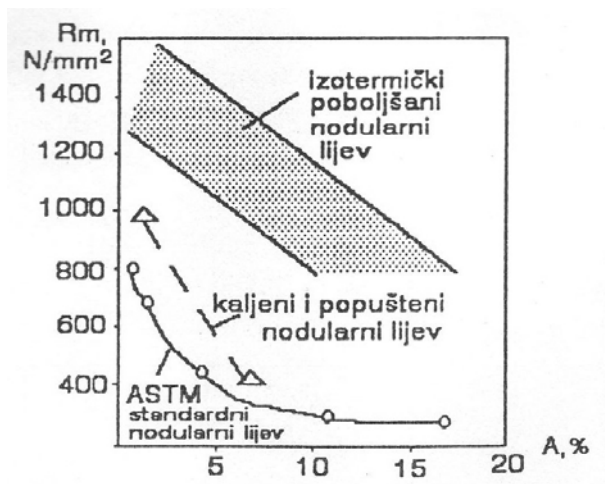
Daljnijim držanjem na temperaturi izotermičke pretvorbe dolazi do raspada austenita na ferit i karbid što se označuje kao II. stadij i drastično smanjuje duktilnost i žilavost.

Nedovoljno dugo držanje na ϑ_{iz} ne omogućuje dovoljnu stabilizaciju austenita pa se on ohlađivanjem do sobne temperature može transformirati u martenzit (nepoželjno!).

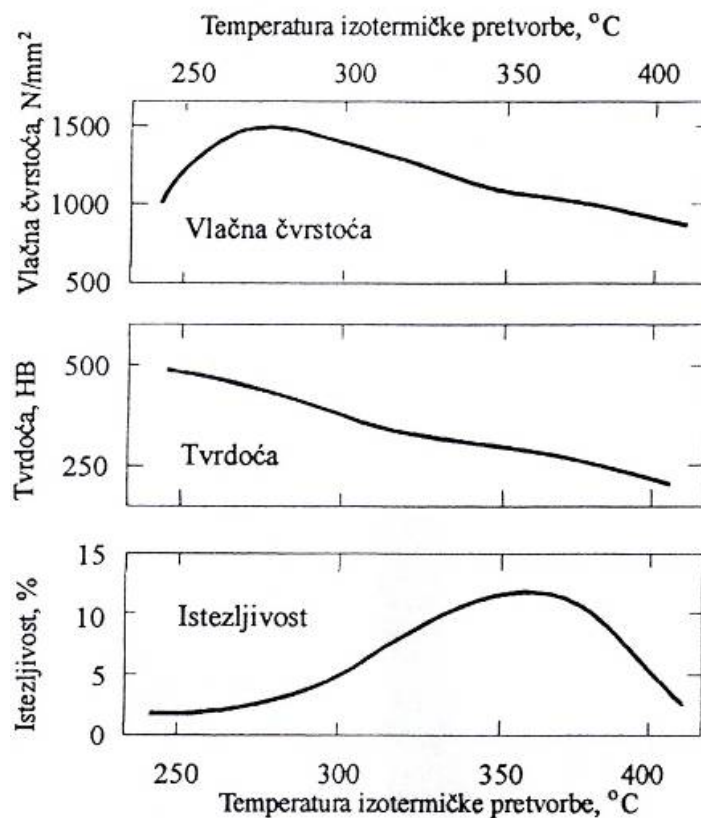
Budući da je svrha izotermičkog poboljšavanja dobivanje mikrostrukture željezne matrice nodularnog lijeva s bainitnim feritom i zaostalim austenitom (čak do 50%), optimalno trajanje držanja na temperaturi izotermičke pretvorbe je između početka I. i završetka II. stadija. To vrijeme ovisi o kemijskom sastavu nodularnog lijeva, temperaturi austenitizacije i temperaturi izotermičke pretvorbe. Izotermički poboljšani nodularni lijev na opisani način će imati optimalna svojstva, [7]

3.4.2 Mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Izotermičkim poboljšavanjem nodularnog lijeva mogu se postići dva puta više čvrstoće nego kod standardnih kvaliteta nodularnog lijeva, a da pri tom žilavost i duktilnost ostanu nepromijenjene. Visoka žilavost i duktilnost izotermički poboljšanog nodularnog lijeva su rezultat austenita u matrici, koja se pretežno sastoji od bainita. Austenit se pretvara u martenzit samo postupkom hladne deformacije. Tvrdća se npr. može povišiti sačmarenjem, a time se ujedno i povišuje otpornost na trošenje te se naravno povećava i dinamička izdržljivost materijala, [8].



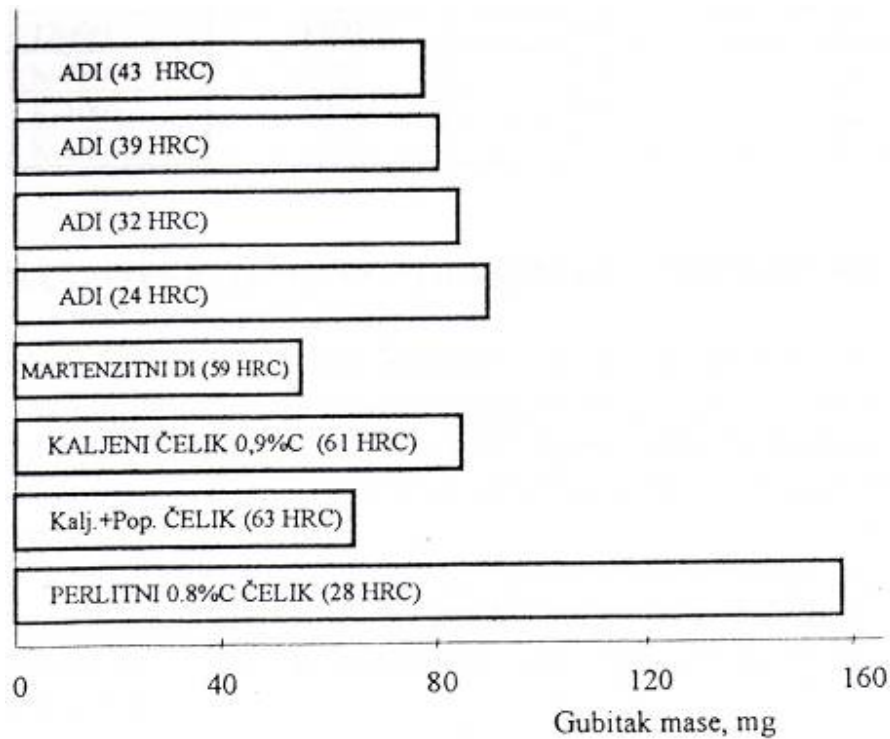
Slika 17. Usporedba mehaničkih svojstava standardnih kvaliteta nodularnog lijeva i izotermički poboljšanog nodularnog lijeva [8]



Slika 18. Utjecaj temperature izotermičke pretvorbe na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, [9]

Jedna od najvažnijih karakteristika izotermički poboljšanog nodularnog lijeva je da se može postići dvostruko veća vlačna čvrstoća (od normiranih ljevova) uz zadržavanje visokih iznosa duktilnosti i žilavosti, slika 18. Žilavost izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (posebno za više razine tvrdoće), usporedive su s vrijednostima žilavosti poboljšanog odljevka od žilavog lijeva. Izotermičkim poboljšavanjem se postiže najbolji odnos čvrstoće i duktilnosti. Osim što ima razmjerno visoku žilavost pri sobnoj temperaturi, izotermički poboljšani nodularni lijev ne pokazuje krhkost ni na temperaturama ispod sobne, [9].

U pogledu triboloških svojstava izotermički poboljšani nodularni lijev pokazuje dobru otpornost na trošenje, slika 19.



Slika 19. Gubitak mase nekoliko različitih izotermički poboljšanih nodularnih lijevova i abrazijski otpornih čelika, [9]

U pogledu nastupajućih deformacija izotermičkim poboljšavanjem se postižu razmjerno male promjene dimenzija (porast oko 0,4%) što je posljedica samih transformacijskih zbivanja i manjih toplinskih naprezanja tijekom hlađenja (nema nastajanja martenzita), [9].

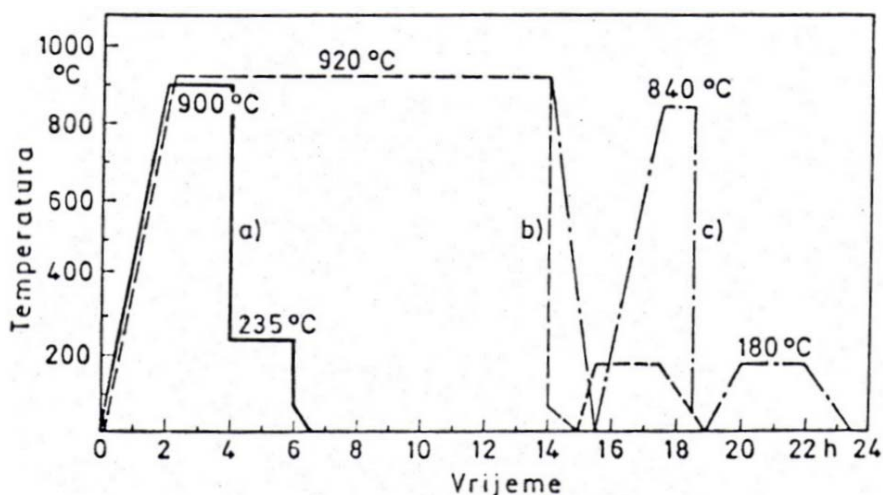
Deformacije nisu ovisne od šarže i ponovljive su. Upravo zbog toga promjena dimenzija može biti unaprijed predviđena i utvrđena za konkretni odljevak pa se dio može obraditi odvajanjem čestica prije izotermičkog poboljšavanja (povoljnije).

Razmjerno visoka tvrdoća izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (od 30 do 48 HRC), a imajući u vidu znatno veće tvrdoće željezne matrice, ukazuju da će njegova obradivost odvajanjem čestica biti teška i uvjetno moguća. Zato se preporuča obradu odvajanjem čestica provesti prije izotermičkog poboljšavanja, [9].

3.4.3 Primjena izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Zbog dobrih mehaničkih i ostalih tehnoloških svojstava izotermički poboljšani nodularni lijev se danas u svijetu primjenjuje u izradi raznih dijelova koji su u radu izloženi kompleksnim opterećenjima. U slučaju visoko dinamički opterećenih dijelova izotermički poboljšani nodularni lijev zamjenjuje otkovke, valjane čelične profile i čelične odljevke čime se postižu značajne uštede i povisuje produktivnost.

Uspoređujući količinu energije, samim time i troškove izrade jednog te istog dijela ako je izrađen od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva prema izradi od čelika ili čeličnog otkovka s odgovarajućom toplinskom obradom (bilo poboljšavanjem ili cementiranjem – slučaj zupčanika) postižu se sljedeće uštede, slika 20.



Slika 20. Usporedba toplinske obrade, tj. potrošnje energije, prilikom proizvodnje zupčanika izotermičkim poboljšavanjem i klasičnim poboljšavanjem ili cementiranjem, [10]

Od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva izrađuju se zupčanici za pogon osovina osobnih vozila i za planetarni prijenos, oslonci opruga u podvozju kamiona, kotači tramvaja i vagona, valjci u valjaonicama, radilice diesel motora, papuče gusjeničara, viljuške mjenjača itd.

4. Proces sačmarenja (kugličarenje, shoot peening)

Povećanje dinamičke izdržljivosti metalnih konstrukcijskih elemenata može se ostvariti primjenom različitih tehnoloških procesa poput:

- savijanja,
- valjanja,
- glačanja,
- kovanja,
- raznih postupaka strojne obrade,
- zavarivanja,
- raznih postupaka toplinske obrade,
- elektrolitičkog taloženja te
- kugličarenja (zrnčenje, sačmarenje, shot-peening)

Vlačna naprezanja, naime, značajno utječu na vijek trajanja mehaničkih komponenti proizvoda, tako da njihova i sasvim mala smanjenja mogu rezultirati velikim povećanjem vijeka trajanja. Tako se, npr. smanjenjem vlačnih naprezanja od 20%, za neke materijale može očekivati povećanje vijeka trajanja i do 200%. Međutim, značajno je spomenuti da neke od mehaničkih obrada materijala znatno smanjuju umor materijala. Tako:

- obrada skidanjem strugotine smanjuje granicu umaranja materijala
- kod martenzitnih čelika za oko 15%, - kod austenitnih slitina na bazi nikla te slitina titana taj utjecaj se povećava za oko 50%
- kemijsko glodanje smanjuje granicu umaranja materijala do 30%,
- elektro-erozija smanjuje granicu umaranja i do 70%.

Jedan od sigurnih načina jest površinsko očvršćivanje konstrukcijskih elemenata, nakon mehaničke obrade na konačnu mjeru, pod određenim, strogo kontroliranim parametrima, a koje se može izvesti na različite načine,[11].

Predlaže se proces kugličarenja, s obzirom da već postoje sigurni i u praksi potvrđeni rezultati, tim više što proces danas odlikuje:

- stabilnost,
- sigurnost,
- ponovljivost,
- laka izvodljivost,
- siguran način kontroliranja,
- bez loših posljedica na metalografske i mehaničke osobnosti materijala
- vremenska kratkotrajnost,
- računalna upravljivost,
- tehnološkičnost,
- laka edukativnost,
- može se koristiti i za stvaranje konture (peen-forming).

4.1 Kugličarenje

Često se nakon strojne obrade uzoraka prelazi na tehnologiju kugličarenja, kontroliranoga tehnološkog postupka površinskog očvršćivanja poradi unošenja tlačnog naprezanja u površinski sloj metala. Provodi se uz pomoć mlaza kuglica (ili nekoga drugog medija) koje velikom brzinom udaraju u metalnu površinu i ostvaruju plastičnu deformaciju u hladnom stanju. Pritom se na metalnoj površini stvara blaga zaobljena udubina za vrijeme njihova kratkog kontakta. Tako nastaje radijalno razvlačenje površine metala u područje plastičnih deformacija, a rubovi se tlačenja lagano uzdižu iznad originalne površine. Zbog velikog broja sudara preko čitave površine, pojavljuje se tanki sloj - "film" površinskih zaostalih tlačnih naprezanja, ispod kojih se uspostavljaju mala uravnotežena vlačna naprezanja. Sloj se tlačnih naprezanja obično pruža oko 0,13 do 0,25 mm, ali su moguće i dubine do 0,5 mm ispod površine, ovisno o intenzitetu kugličarenja i prirodi kugličarenog materijala.

Kugličarenjem se mijenja razdioba naprezanja u površinskom sloju koja je već prije bila stvorena nekim drugim tehnološkim postupkom; ono zapravo mijenja neželjene uvjete zaostalog vlačnog naprezanja u povoljnije tlačno naprezanje pogodno za povećanje otpora nastanku pogrešaka, a koje su najčešće izazvane korozijom i umorom površine. Kugličarenje povećava otpornost prema interkristalnoj koroziji i smanjuje utjecaj triboloških mehanizama na metalnoj površini. Pri zavarivanju, kugličarenjem se smanjuje utjecaj

koncentracije naprezanja izazvanih postojanjem zareza, udubina i pukotina, tj.

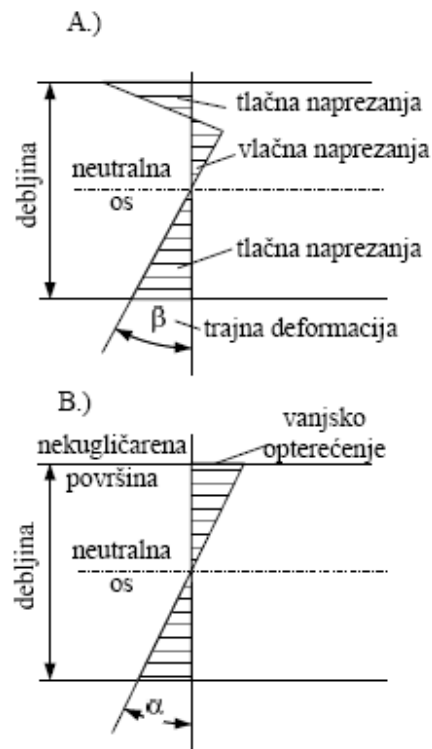
kugličarenjem se usporava njihovo razvijanje zbog djelovanja tlačnog naprezanja, povećavajući time dinamičku izdržljivost,[11].

Može se reći da se kugličarenjem postižu dva bitna mehanička učinka:

1. ostvareni plastični rad pokazuje da dolazi do otvrdnjavanja deformacijom, što uzrokuje promjenu tvrdoće površinskog sloja i povećanih granica razvlačenja;

2. elastično-plastični oporavak u površinskim slojevima inducira zaostalo tlačno naprezanje i ono povećava potrebnu razinu naprezanja za nastajanje pukotine, te jednako tako usporava i razvoj pukotine uz pomoć smanjenja resultantnoga primijenjenog naprezanja .

Primjenom procesa kugličarenja dolazi do površinskog očvršćivanja materijala, gdje se najveća vlačna naprezanja mogu «prebaciti» od površine elementa prema dubini materijala, pa im, sada, treba nešto više vremena da bi postala uzrokom pukotine na površini, odnosno uzrokom loma konstrukcijskog elementa.



Slika 21. Razdioba naprezanja na kugličarenom uzorku, [11] :

- A.) tlačno i vlačno naprezanje- deformirani uzorak
uslijed kugličarenja (veliki intenzitet I);*
B.) bez kugličarenja-samo vanjsko opterećenje.

Na kvalitetu izvedbe ovog procesa utječe čitav niz parametara:

- tip, veličina i oblik abraziva (kuglica),
- vrijeme izlaganja elementa mlazu kugličarenja,
- brzina kretanja kugličarenog elementa kroz mlaz,
- količina protoka abraziva u jedinici vremena,
- tlak zraka mlaza na kugličareni element,
- čistoća zraka,
- udaljenost otvora mlaznice od kugličarenog elementa,
- kut nagiba otvora mlaznice prema kugličarenom elementu,
- snaga (intenzitet) kugličarenja,
- postotak prekrivenosti kugličarene površine elementa mlazom,
- ponovljivost međusobnog usklađenog kretanja(mlaznica/element).

Kugličarenje je tehnološki process koji se uspješno primjenjuje u strojarskoj industriji u cilju: - povećavanja dinamičke izdržljivosti materijala,

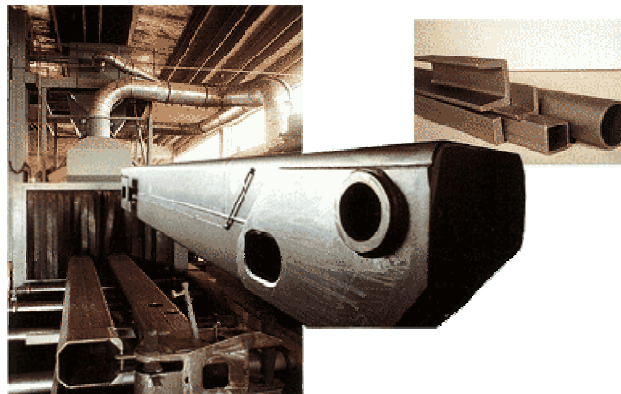
- ojačavanja površinskih slojeva u kristalnoj mreži materijala,
- sprečavanja i otklanjanja korozije i napetosne korozije, kao i korozije uslijed trenja i kovanja te
- sprečavanja i otklanjanja stvaranja mikro-pukotina i pukotina uslijed naprezanja, ali i u cilju čišćenja (dekontaminacije) površine konstrukcijskog elementa i stvaranja fine hrapavosti njegove površine za prihvat temeljnog sloja boje.

Sam postupak kugličarenja ovisi o nizu parametara koji moraju biti dobro procijenjeni, u protivnom je moguće pogoršati svojstva obrađivanog materijala. Kontrola postupka procesa kugličarenja je, stoga, od iznimne važnosti za osiguravanje kvalitete konačnog proizvoda. Kugličarenje (zrnčenje ili sačmarenje) široko je rasprostranjena metoda obrade površine korištena za poboljšanje značajki umora materijala i otpornosti na koroziju zbog naprezanja mnogih kovina.

Proces kugličarenja, kojim se unose tlačna naprezanja u površinski sloj metala, rezultira u njemu povoljnijim stanjem naprezanja. Sačmarenje je ne abrazivni proces hladnog deformiranja površine materijala. Deformacija se ostvaruje mlazom čeličnih kuglica koje velikom brzinom udaraju u površinu. To je postupak izbacivanja metalne sačme iz turbine velikom brzinom (76 m/s). Kombinacijom lomljene i okrugle sačme, kao i granulacijom sačme postižu se razni učinci na sačmarenjnoj površini. To je u potpunosti automatiziran postupak. Sačmarenje se koristi i kao postupak modificiranja površine materijala hladnom deformacijom ,[11].



Slika 22. Postupak sačmarenja [11]



Slika 23. Postrojenje za sačmarenje [11]

Prema namjeni, dimenziji i broju obradka izrađuju se namjenske sačmarilice,[11].

4.2 Kontrola tijeka postupka kugličarenja

Cilj kontroliranog procesa kugličarenja jest proizvesti tlačno napregnuti površinski sloj konstrukcijskog elementa u kojem će jednoobraznost, količina unesenog naprezanja i dubina napregnutog sloja biti konstantne na svakom dijelu obrađivanog elementa.

Željena količina naprezanja, dubina prostiranja tlačnoga sloja i stupanj prekrivanja konstrukcijskog elementa mlazom abraziva moraju biti dobivene temeljem dobro odabranih kombinacija preostalih utjecajnih parametara procesa, ali i relativnog kretanja između kugličarenog elementa i mlaza abraziva.

U praksi se kontrola kugličarenja svodi na: -1) kontrolu procesa kugličarenja i
- 2) kontrolu kugličarenog elementa.

1) *Pod kontrolom procesa kugličarenja podrazumijeva se periodična kontrola svih čimbenika procesa poput:*

- glavnih osobnosti abraziva (veličina, izgled, kakvoća),
- svih sustava uređaja za kugličarenje,
- protoka zraka i abraziva,
- brzine kretanja po X,Y,Z osima,
- kvalitete filtara i otprašivanja uređaja i separatora abraziva i
- svega ostalog što može utjecati na kvalitetno i pouzdano odvijanje procesa.

2) *Stoga se kontrola kugličarenog elementa, uz ovu prethodnu, svodi se na:*

-kontrolu temeljenu na iskustvenim podacima bez oštećivanja elementa u proizvodnim uvjetima i kontrolu točnim metodama izračuna i mjerenja zaostalih naprezanja uz oštećivanje elementa u laboratorijskim uvjetima.

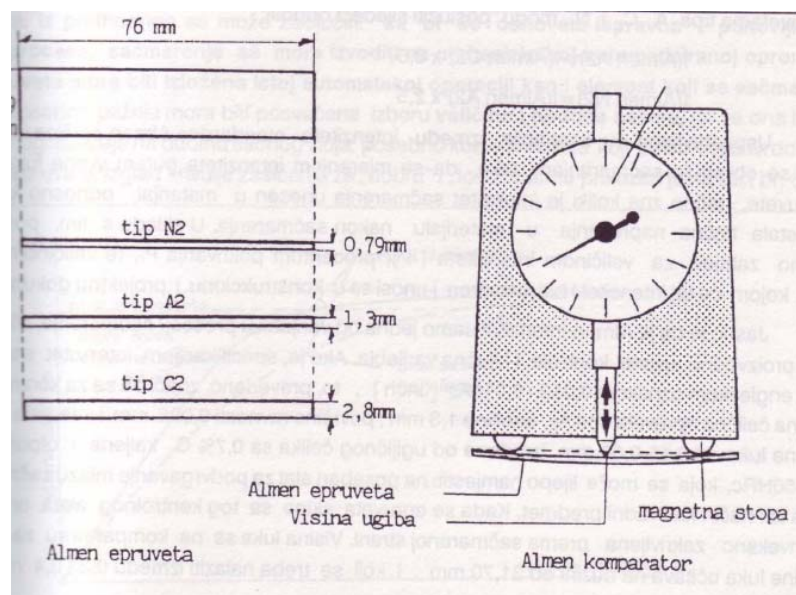
U proizvodnim uvjetima kontrola kvalitetnog izvođenja procesa kugličarenja izvodi se, uglavnom, mjerenjem snage kugličarenja (intenziteta- I), zasnovana na mjerenju progiba standardnog uzorka. U laboratorijskim uvjetima koristi se čitav niz metoda razaranjem elementa, ali i bez razaranja (NDI), od kojih su najčešće korištene:

- foto-električna metoda, metoda ultrazvuka (akustična),
- elektromagnetska metoda,
- metoda neuronske difrakcije,
- metoda «X-zraka»,
- metoda holografske interferometrije,
- metoda pozitronskog zračenja,
- metoda kemijskog nagrivanja,
- metoda ozublivanja,
- metoda bušenjem rupa, metoda skidanjem slojeva materijala,
- metoda «izvora naprezanja» itd.

4.2.1 Almen metoda mjerenja

Nakon ustanovljavanja korektnog rada svih sustava uređaja, Almen metoda mjerenja progiba standardnog uzorka posebnim Almen-komparatorom čini se, u proizvodnim uvjetima najjednostavnijom i dovoljno točnom. Ova se metoda zasniva na korištenju standardnih specifikacija za odgovarajući materijal i korišteni abraziv u procesu kugličarenja i odgovarajuću snagu (intenzitet) mlaza kojim se kugličarenje izvodi.

Specifikacije intenziteta mlaza abraziva zasnivaju se na prethodno izmjerenom djelovanju zaostalih naprezanja u standardnom uzorku zvanom Almen-uzorak (epruveta). To je ravna metalna pločica površine 19x76 mm, (tip A,C i N), načinjena od opružnog čelika (47HRC) koja se pričvrsti za standardni metalni blok, kugličari određenim parametrima i potom otpusti od pričvršćenja, dobivši stanoviti ugib prema kugličarenoj strani. Mjerenjem visine luka ugiba , uz usporedbu s pomoću standardnih tablica spoznaje se učinak procesa kugličarenja,[11].



Slika 24. Almen metoda mjerenja,[11]

U svrhu što praktičnije primjene specificirana su područja intenziteta koja će se mjeriti određenim Almen uzorcima, naznačenim u SAE priručniku, AMS2430 i MIL-S-13165-C.

U tablici 2 su dane preporuke za Al-slitine:

Tablica 2. Parametri kugličarenja Al-slitine[11]

Debljina (mm)	Intenzitet I (čelične kuglice) (A)	Intenzitet I (staklene kuglice) (N)
Manje od 0,2286 mm		0,004-0,008 N
Od 2,286 mm do 9.525 mm	0,006-0,010 A	0,008-0,012 N
Više od 9,525 mm	0,010-0,014 A	0,012-0,016 N

Kao odnos parametara kugličarenja i vrijednosti intenziteta I očitano na Almen uzorcima tipa A, C i N koriste se slijedeći odnosi:

$$-I(\text{Almen A2}) = I(\text{Almen C2}) \times 3,5 \text{ i}$$

$$-I(\text{Almen N2}) = I(\text{Almen A2}) \times 2,5.$$

Putem visine luka progiba na uzorku, može se ustvrditi kolika su zaostala naprezanja unesena u materijal kugličarenjem, a temeljem toga i koliko je povećanje dinamičke izdržljivosti.

Temeljem toga u procesu kugličarenja postavlja se samo zahtjev za:

- ostvarenjem intenziteta I ,
 - postotkom prekrivanja površine odgovarajućim mlazom (Pr)
 - veličinom (promjerom) abraziva (Φ) kojom će taj intenzitet biti ostvaren
- i unosi se u konstrukcijsku i projektnu dokumentaciju.

Almen-uzorak treba biti postavljen na točno određenim mjestima tijekom kugličarenja konstrukcijskog elementa da bi bio izložen istoj operaciji kao i element koji se kugličari. U nacrtu elementa kojeg treba kugličariti moraju biti jasno i vidljivo uneseni zahtjevi za kvalitetom procesa kugličarenja, koji uključuju:

- tip i veličinu abraziva,
- intenzitet kugličarenja I izražen preko veličine luka (progiba) Almen uzorka
- stupanj prekrivanja mlazom abraziva Pr .

ZAKLJUČAK:

1. Kontrolni postupak procesa kugličarenja iznimno je značajan za točno i kvalitetno odvijanje ovog tehnološkog procesa, bez obzira radilo se samo o njegovom izvođenju u svrhu povećanja čvrstoće umaranja materijala ili pak i o oblikovanju kugličarenjem (peen-forming).
2. Svi parametri procesa moraju biti strogo kontrolirani, zabilježeni i moraju se nalaziti unutar dopuštenih granica, te pohranjeni u bazu podataka proizvođača, kako bi, za slučaj potrebe, bili uvijek dostupni.
3. Ne treba napominjati koliko je važno točno izvođenje svih potrebnih mjerenja.
4. Prikazani postupak kontrole procesa je jednostavan, jeftin, a nadasve svrhovit i ne zahtijeva posebnu vještinu i naprezanje djelatnika.

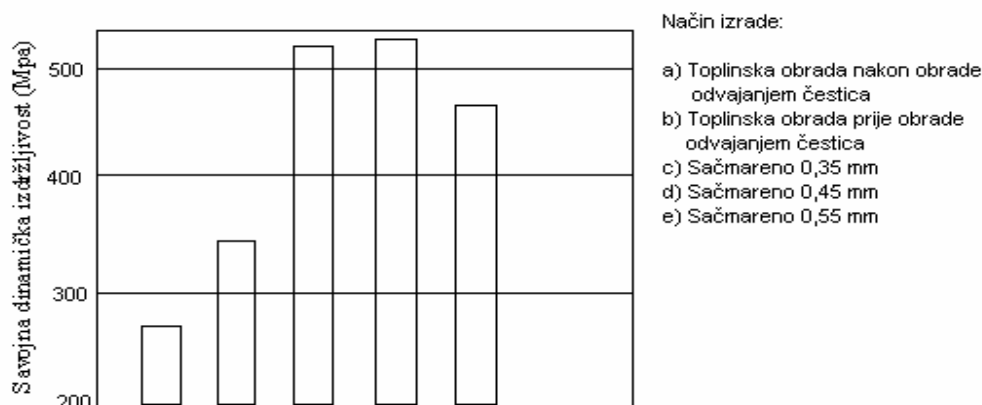
4.3 Sačmarenje-kugličarenje ispitivanog izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (primjer iz literature)

Sačmarenjem izotermički poboljšanog nodularnog lijeva na površini materijala stvaraju se jednoliko raspoređeni krateri, lokalnom deformacijom se u površinu materijala unose tlačna naprezanja koja zaostaju u materijalu i sprečavaju stvaranje i porast inicijalnih pukotina, a time i lom materijala.

Polazeći od teorijskih postavki da se hladnom transformacijom izotermički poboljšanog čelika zaostali austenit može transformirati u martenzit u ovom je radu opisana ista pojava kod izotermički poboljšanog nodularnog lijeva NL 60.

Hladnom deformacijom izotermički poboljšanog materijala zaostali se austenit dijelom transformira u martenzit. Na taj je način moguće dodatno povećati površinsku tvrdoću, a time i opću otpornost na trošenje. Nastale tlačne napetosti u površinskom sloju povišuju dinamičku izdržljivost, [12].

U histogramu na slici 25. prikazano je koliko se može dodatno povećati, hladnom deformacijom površinskih slojeva sačmarenjem, dinamička izdržljivost izotermički poboljšanog nodularnog lijeva čvrstoće 1000 N/mm^2 .



Slika 25. Utjecaj hladne deformacije (očvršnuća) na savojnu dinamičku izdržljivost, [12].

4.3.1 Svojstva i mogućnost primjene izotermički poboljšanog i naknadno sačmarenog nodularnog lijeva

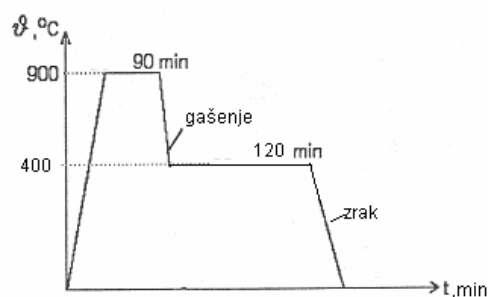
Svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (ADI) ovise o nizu faktora: temperaturi i vremenu austenitizacije i izotermičkog poboljšavanja, brzini ohlađivanja, kemijskom sastavu i strukturi materijala. Perlitni nodularni lijev prije izotermičkog poboljšavanja ima perlitnu matricu s jednoliko raspoređenim nodulama grafita. Nakon toplinske obradbe matrica se sastoji od bainita i relativno puno zaostalog austenita (20-40%). Taj austenit pridonosi visokoj žilavosti i duktilnosti ADI, a hladnom deformacijom se može pretvoriti u martenzit čime se materijalu dodatno povećava tvrdoća i čvrstoća. Cilj ovog rada je ispitivanje ADI s novim svojstvima koja mu omogućuju primjenu u izradi dijelova koji su do sada izrađivani isključivo od čelika. Očekuje se da će se objasniti kako različiti parametri kugličarenja (shot peening) utječu na strukturu i svojstva površine ADI. Materijal od ADI je lakši od čelika, jeftiniji i jednostavniji za proizvesti, a u eksploatacijskim svojstvima je približno jednak dijelovima izrađenima od cementiranog čelika. U prijenosnicima motornih vozila još uvijek se koriste uglavnom čelični cementirani zupčanici. Istraživanje je usmjereno na poboljšavanje mehaničkih i triboloških svojstava ADI i to prvenstveno radnih površina postupkom kugličarenja,. Svojstva tako izrađenog dijela biti će ista, a vjerojatno i bolja od cementiranog sloja. ADI jezgra će, uz vrlo dobru čvrstoću, žilavost i tiši rad, doprinijeti i smanjenju mase do 10% što rezultira manjom potrošnjom goriva i manjom emisijom štetnih plinova. Procijenjeno je da bi i cijena tako izrađenih strojnih dijelava bila oko 60% cijene čeličnog. Daljnjim istraživanjem bi se omogućila nova područje primjene ADI: u energetske postrojenjima, transportnim sredstvima, poljoprivrednoj mehanizaciji, prehrambenoj, farmaceutskoj i vojnoj industriji, [14] .

5. Eksperimentalni dio

Uzorci nodularnog lijeva izliveni su u brodogradilištu Brodosplit u Splitu.

5.1 Izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva

U ovom radu ispitana je otpornost na erozijsko trošenje nodularnog lijeva koji je termički poboljšan u Laboratoriju za toplinsku obradu FSB-a. Temperatura austenitizacije je iznosila 900°C u trajanju od 90 minuta, a temperatura izotermičke pretvorbe iznosila je 400°C u trajanju od 60 minuta.



Slika 26. T-t dijagram izotermičkog poboljšavanja

5.2 Kugličarenje

Postupak kugličarenja proveden je na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Parametri kugličarenja su bili sljedeći:

- oznaka kuglica S 390 a promjer kuglica je iznosio 1 mm
- kut udara sačme: 45°
- tlak: 8 bara
- vrijeme kugličarenja: 30 sekundi.

5.3 Kemijska analiza uzoraka

Kemijski sastav materijala određuje se kemijskom analizom. S obzirom na to što se želi odrediti, analiza se može podijeliti na kvalitativnu i kvantitativnu analizu. Kvalitativnom analizom određujemo samo prisutnost pojedinih elemenata, dok kvantitativnom analizom određujemo njihov udio, odnosno koncentraciju.

Za uzorak nodularnog lijeva koji je izrezan iz ploče napravljena je kvantitativna analiza kemijskog sastava. Analiza je napravljena u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica 6. Analiza kemijskog sastava uzorka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Oznaka uzorka	%								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Mg
Izotermički poboljšani nodularni ljev	2,34	2,72	0,72	0,054	0,011	1,14	0,095	0,016	0,033

Kemijska analiza obavljena je spektrometrijskom metodom na uređaju SPECTRUMAT-750 GDS Leco.



Slika 27. Spectrumat - 750 GDS Leco

Ovaj uređaj radi na principu optičke emisijske spektrometrije. Ispitivani uzorak predstavlja katodu u uređaju. Njegovi atomi pobuđuju se ioniziranim argonom. Pri prijelazu iz stanja više energije u stanje niže energije atomi ispitivanog uzorka oslobađaju energiju u obliku svijetla koje na fotomultiplikatoru pretvara u napon. Napon se očitava na ekranu. Postupak pobuđivanja atoma ispitivanog uzorka odvija se u vakuumu. Fotomultiplikator ima mogućnost analize dvadeset dva različita elementa. Prilikom određivanja udjela pojedinog elementa potrebno je provesti kalibraciju uređaja referentnim materijalima ili certificiranim referentnim materijalima kojima je poznat kemijski sastav. Kalibriranje se provodi s najmanje pet etalona. Da bi se na ovom uređaju obavila analiza, uzorak mora biti:

- električki vodljiv
- planparalelan
- minimalnih dimenzija $17 \times 17 \times 17$ mm

Prije početka same analize obavlja se predspaljivanje uzorka kako bi se uzorak očistio od nečistoća.

5.4. Materijalografsko ispitivanje uzoraka

Materijalografija je područje znanosti o materijalima unutar kojeg se stručnjaci bave analizom i boljim razumijevanjem strukture materijala, te razvojem i primjenom tehnika i postupaka izrade uzoraka za analizu.

Osnovni zadatak materijalografije je da se pri poznatom kemijskom sastavu i iz izgleda mikro i makrostrukture odrede okvirna svojstva materijala. Primjena materijalografije je i u području kontrole proizvodnje, kao i pri utvrđivanju grešaka u materijalu i njihovih uzroka.

Za uzorak izotermički poboljšanog nodularnog lijeva napravljena je materijalogrfska analiza. Analiza je napravljena u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

5.4.1. Priprema materijalografskih uzoraka

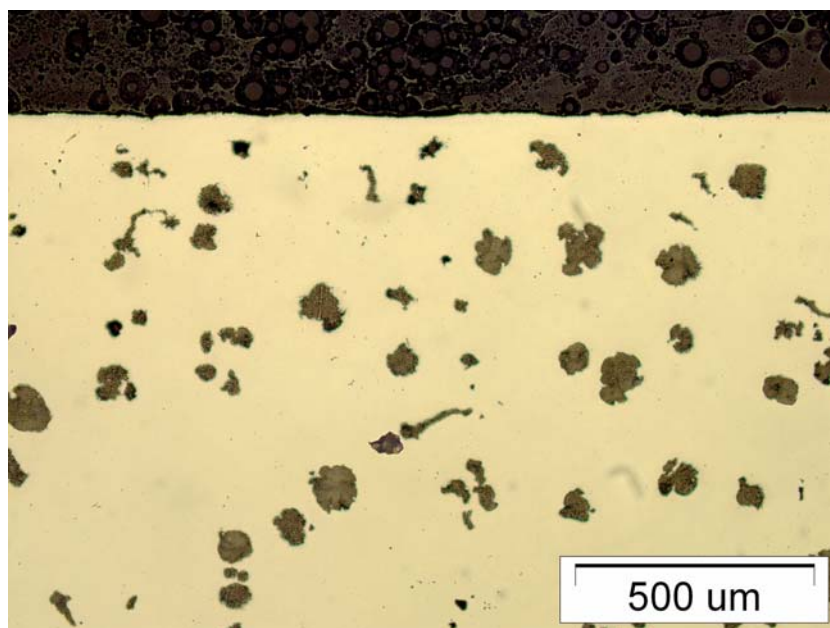
Osnovni uvjet za uspješnu analizu strukture materijala i ispravne rezultate je da analizirani uzorak bude reprezentativan i dobro pripremljen. Postupak analize materijala podijeljen je u šest skupina:

- a) izdvajanje uzorka
- b) zalijevanje uzorka u masu (durofix)
- c) brušenje –granulacije: 120
220
500
- d) poliranje –pasta: 6 μm
1 μm
- e) nagrivanje-otopina Nitrala
- f) fotografiranje- svjetlosni mikroskop Olympus BH-2

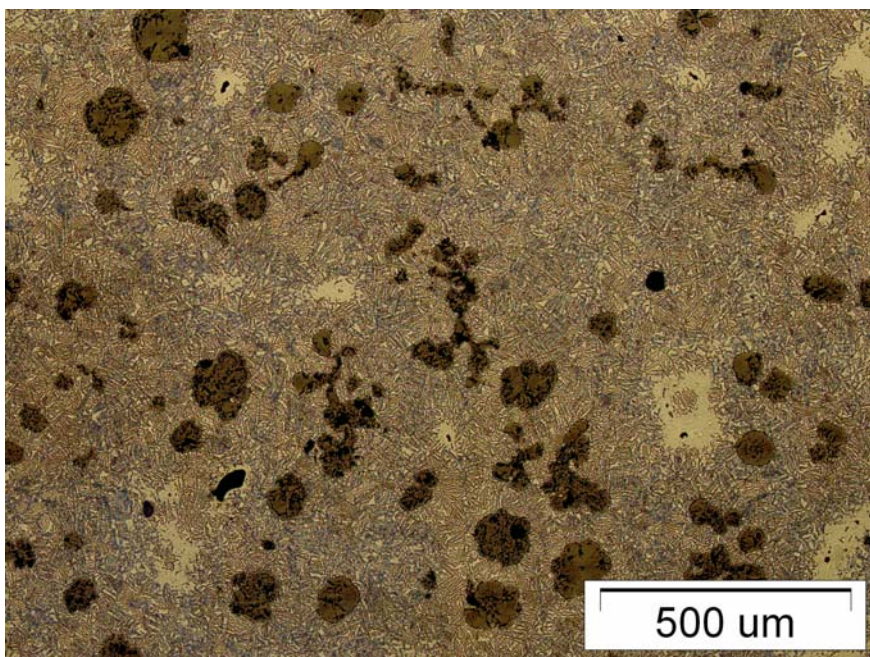
Najčešće je potrebno uočiti pojedine strukturne konstituente ili faze vidljivima. To se postiže izlaganjem tih konstituenata različitim kemikalijama. Ovisno o tipu kristala, sastavu, kemijskoj postojanosti, kristalnoj orijentaciji, različiti konstituenti različito reagiraju na kiseline. Stoga se koristi veliki broj kiselina i njihovih otopina koje nagrizzaju samo one strukturne faze koje želimo analizirati. Uz koncentraciju kiselina, parametri koji utječu na proces nagrizzanja su temperatura i vrijeme nagrizzanja. U ovom slučaju uzorak je bio nagrizzan s 3% otopinom Nital-a. Nital je otopina dušične kiseline u alkoholu

U nastavku su dane slike ispitivanog uzorka pri povećanjima 100x, 200x, 500x, u poliranom i nagrizzenom stanju.

Fotografije su slikane na svjetlosnom mikroskopu Olympus BH-2 povećanje 40x-1000x.

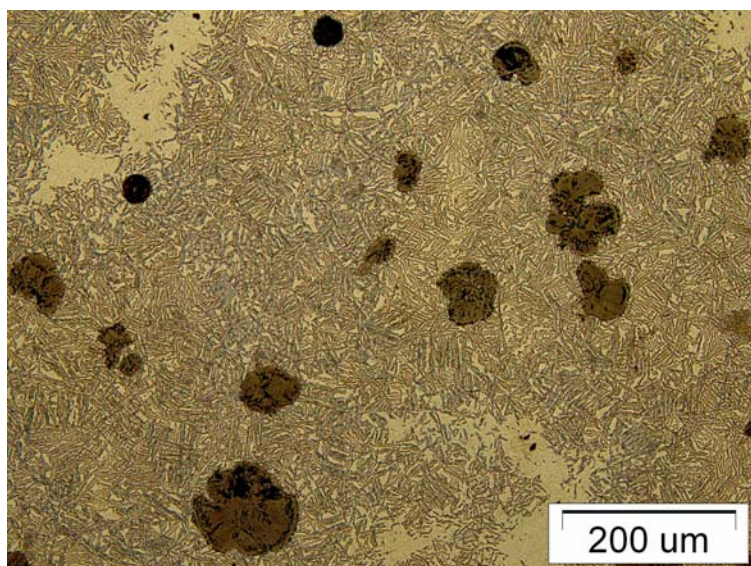


Slika 28. Mikrostruktura uzorka u poliranom stanju, povećanje 100 x

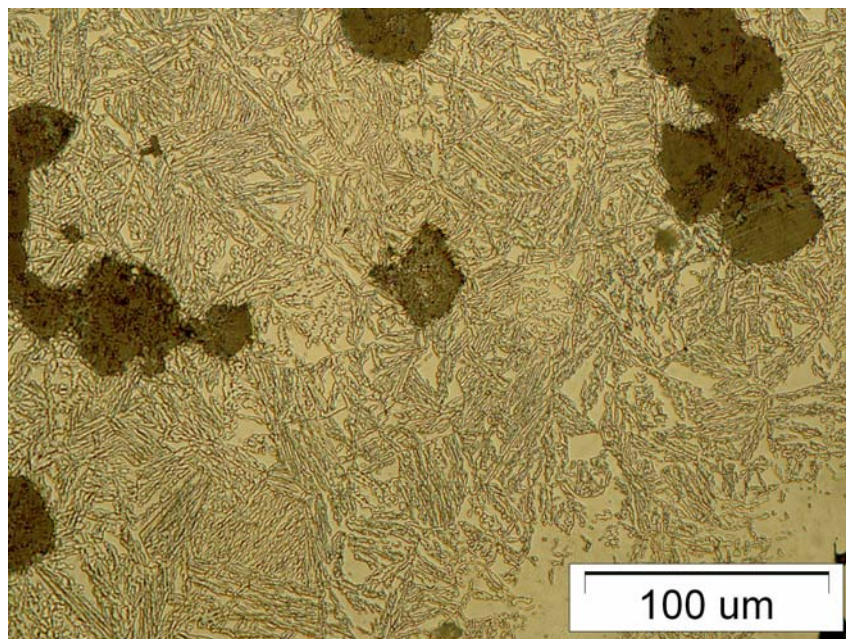


Slika 29. Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 100x

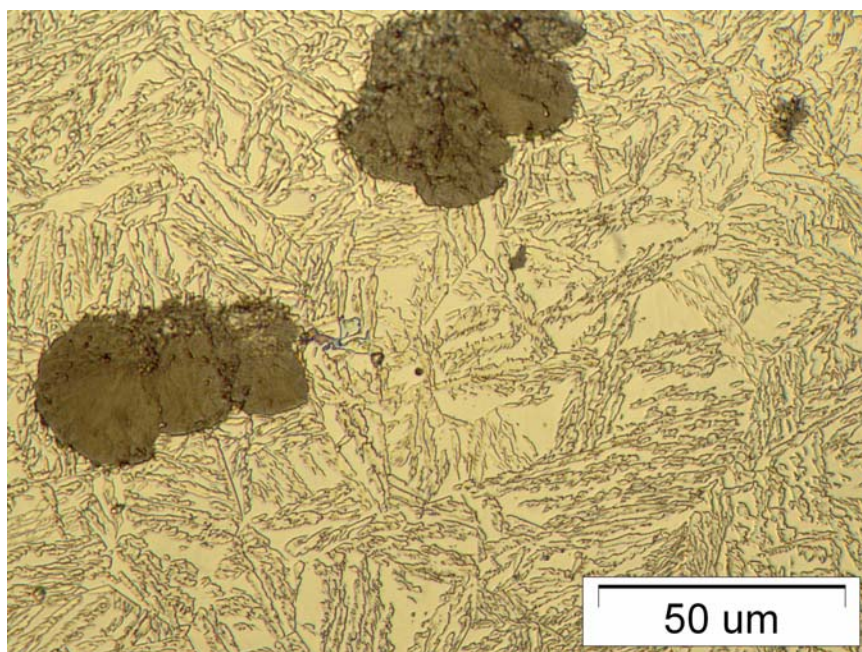
Na slikama 29 i 30 vidljiva je mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva s jasno uočljivim grafitnim nodulama u željeznoj matrici.



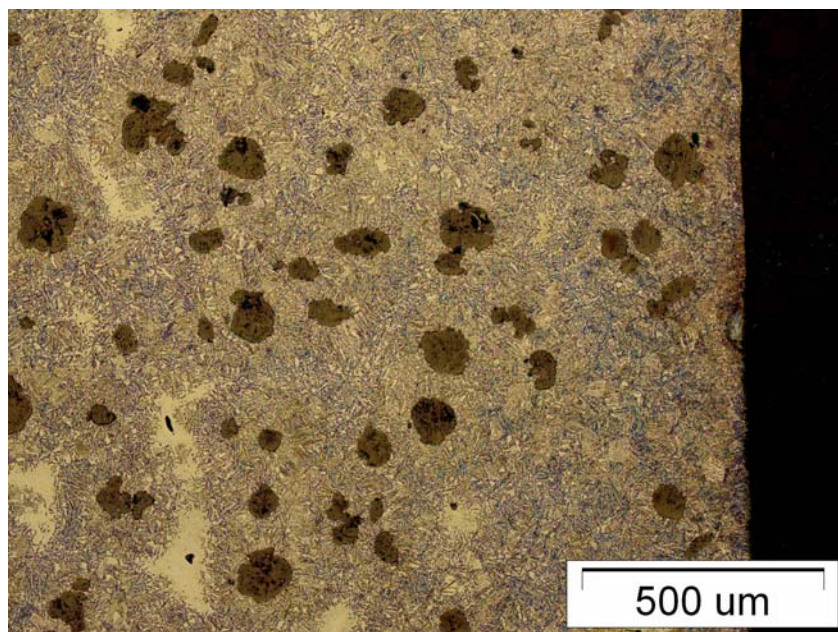
Slika 30. Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 200x



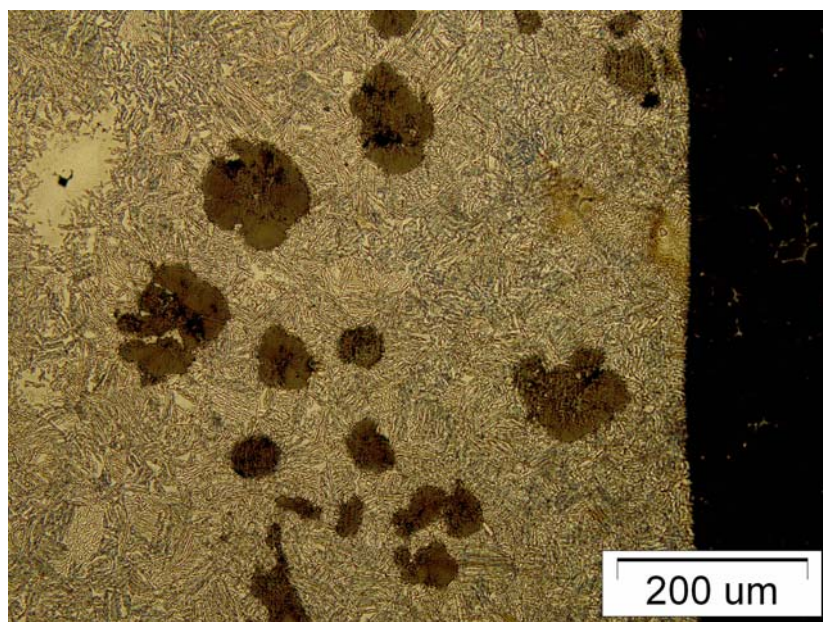
Slika 31. Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 500x



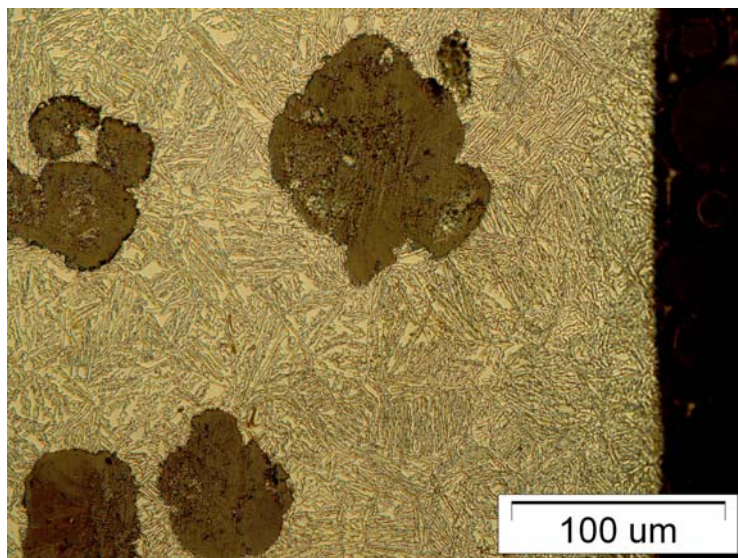
Slika 32. Mikrostruktura jezgre uzorka u nagriženom stanju, povećanje 1000 x



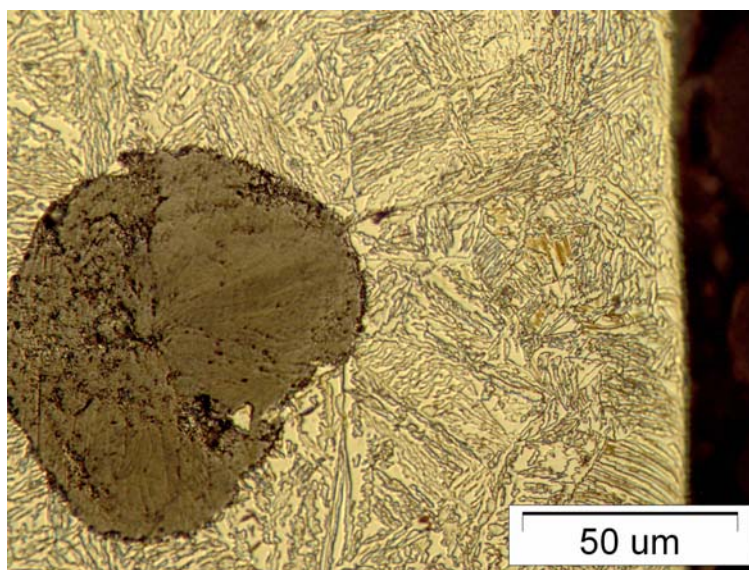
Slika 33. Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 100 x



Slika 34. Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 200 x



Slika 35. Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 500 x



Slika 36. Mikrostruktura ruba uzorka u nagriženom stanju, povećanje 1000 x

Na fotografijama uzoraka u nagriženom stanju jasno je vidljiva struktura željezne matrice od igličastog bainita koji okružuje grafitne nodule. Na slikama je vidljivo da je mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva kvalitetna, tj. da su nodule fino i ujednačeno dispergirane te da nema prisutnih poroznosti u lijevu.

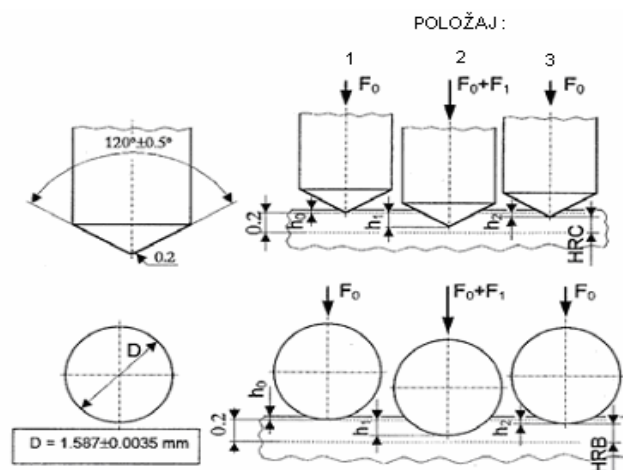
5.5 Ispitivanje tvrdoće uzoraka

5.5.1 Ispitivanje tvrdoće HRC metodom

Kod ove metode se u metal (po ovoj metodi se mjeri tvrdoća samo metalnih materijala) utiskuje dijamantni stožac (engl. "cone" - HRC metoda) ili kuglica od kaljenog čelika (engl. "ball" - HRB metoda). Penetrator je dijamantni stožac s vršnim kutom od 120° . Kod Rockwellove metode se, za razliku od Brinellove i Vickersove, mjeri dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska.

Tvrdoća se po HRC metodi mjeri na slijedeći način:

U položaju 1 penetrator se predopterećuje silom $F_0 = 100 \text{ N}$ što za posljedicu ima prodiranje penetratora ispod površine uzorka. Ta točka je i početni položaj za mjerenje dubine prodiranja. Ukupna moguća dubina prodiranja iznosi $0,2 \text{ mm}$ i podijeljena je na 100 dijelova. Jedna podjela iznosi prema tome $0,002 \text{ mm}$, i predstavlja jedan stupanj tvrdoće po HRC metodi. Skala je okrenuta naopako, pa početnom položaju pripada vrijednost 100, a najvećoj mogućoj dubini prodiranja 0. Razlog tomu je činjenica da se manjoj dubini prodiranja (tvrđi materijali) pridružuje veći broj koji karakterizira veću tvrdoću, i obrnuto.



Slika 37. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC i HRB metodi, [13]

Nakon predopterećenja ($F=98\text{ N}$) slijedi glavno opterećenje ($F=1373\text{ N}$) pa je u položaju 2 penetrator opterećen s ukupno 1471 N .

Taj položaj ne predstavlja tvrdoću po HRC-u jer je penetrator opterećen ukupnom silom (1471 N). Slijedi rasterećenje glavnog opterećenja ($F=1373\text{ N}$), ostaje samo predopterećenje ($F=98\text{ N}$), a penetrator se uslijed elastičnosti materijala vrati u položaj 3.

Ova dubina predstavlja tvrdoću, tj. u ovom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera. Naime, svaki tvrdomjer koji mjeri tvrdoću po Rockwell-ovoj metodi ima mjerni sat čija je skala podijeljena u stupnjevima HRC.

Po HRC metodi gotovo isključivo se mjeri tvrdoća toplinski obrađenih čelika. Zato se metoda najviše koristi u pogonskim uvjetima, u prijemnoj kontroli poluproizvoda, te za praćenje efekata postupka toplinske obrade čelika.

Postupak mjerenja je puno brži nego kod Brinella i Vickersa, no selektivnost metode slabija. Naime, mjerno područje je podijeljeno na 100 jedinica, a mjere se najčešće materijali tvrdoće između 20 i 70 HRC.

Prednosti metode:

- mjerenje je brzo, tvrdoća se očitava na skali tvrdomjera
- nije potrebna brižljiva priprema mjerene površine

Nedostaci metode:

Slaba selektivnost metode. Čitavo mjerno područje je od 0 do 100 HRC (teoretski) praktički od 20 do 70 HRC. Stoga se ova metoda koristi gotovo samo u pogonima, gotovo isključivo na toplinski obrađenim čelicima. Nepreciznost: $\pm 2\text{ HRC}$.

Tablica 7 daje prikaz tvrdoće uzorka oznake 0 izmjerenih pomoću tvrdomjera laboratorija za mehanička ispitivanja FSB-a.

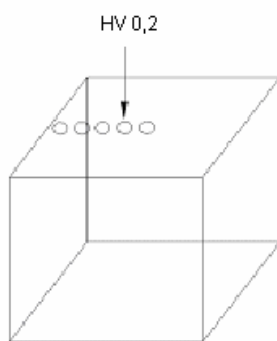
Tablica 7. Tvrdoća uzoraka

Oznaka uzorka	Broj mjerenja	Tvrdoća	Srednja tvrdoća
0	1.	26 HRC	26,5 HRC
	2.	27 HRC	
	3.	26,5 HRC	
	4.	26 HRC	
	5.	26 HRC	

5.5.2. Ispitivanje mikrotvrdoće HV 0,2

Vickers metoda

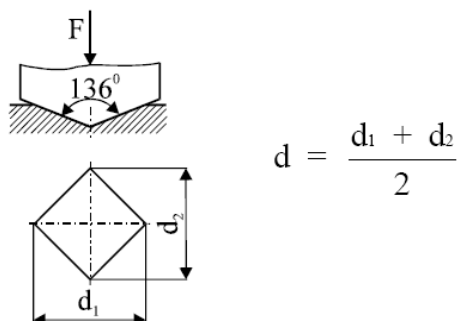
Uzorak je prikazan na sljedećoj slici:



Slika 38. Uzorak na kojem je ispitivana mikrotvrdoća

Ispitivanje se vršilo od ruba ka jezgri uzorka tako su i izmjerene mikrotvrdoće prikazane u sljedećoj tablici numerirane od 1 do 10.

Mikrotvrdoća je ispitana na tvrdomjeru (HV, Knoop) Zwick, Njemačka, a izraz za izračunavanje 'd' po Vickers-u je:



Slika 39. Mjerenje tvrdoće po VICKERS-u , [13], (2)

Sila pritiska kod mjerenja je iznosila 200 g ,HV 0.2

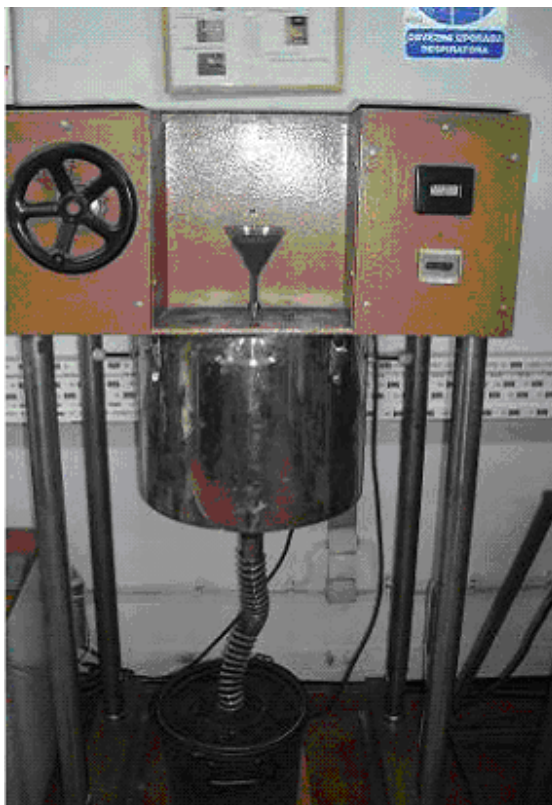
Rezultati mikrotvrdoće očitani su iz tablica prema dobivenim dužinama dijagonala i parametru m za zadano opterećenje HV 0,2.

Tablica 8. Mikrotvrdoća po Vickers-u

X.	d(μm)	HV0,2	Udaljenost od površine(μm)
1.	27,4	494	100
2.	31,4	376	200
3.	38,6	249	300
4.	40,1	231	400
5.	35,6	293	500
6.	32,6	349	600
7.	34,4	313	700
8.	35,9	288	800
9.	34,1	319	900
10.	36,5	278	1000

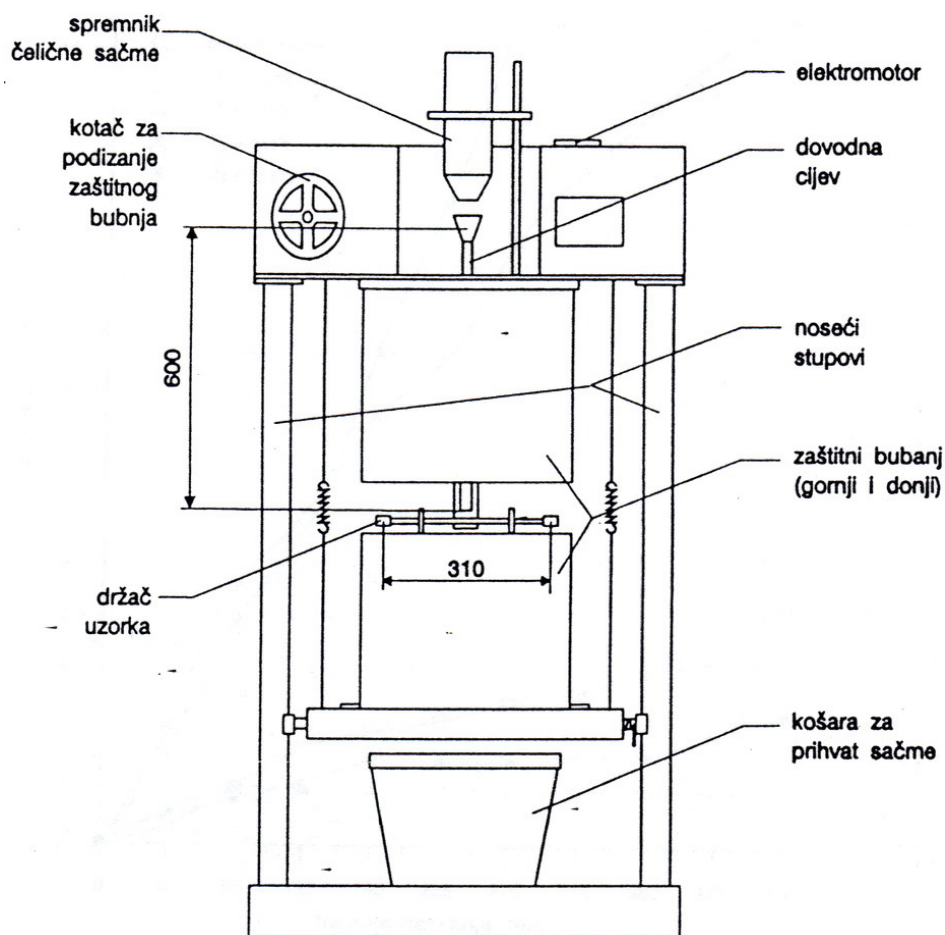
5.6 Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

U ovom radu nastoji se utvrditi otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva ovisno o kutu upada i vrsti abraziva, tj. erozivnih čestica. Korišten je uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje Laboratorija za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prikazan na slici 40.



Slika 40. Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju

Prilikom ispitivanja korištene su tri vrste abraziva. Abraziv u ovom tribosustavu su čestice kvarcnog pijeska OTAWA AFS 50/70 veličine oko 300 μm i tvrdoće oko 1200 HV0.03, te dvije vrste čelične sačme srednjeg promjera 1100 μm i 700 μm . Kut upada abraziva je definiran kao nagib između površine materijala i putanje čestica abraziva. U ovom radu svi uzorci ispitivanog materijala izloženi su erodiranju pod šest različitih kutova upada čestica, i to pod: 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°. Na svakoj stranici kvadratnog uzorka ispitivan je po jedan kut. Shema uređaja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje prikazana je na slici 41.



Slika 41. Shema uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju

5.6.1 Parametri ispitivanja trošenja erozijom

Svaki uzorak je podvrgnut erozijskom trošenju tako da se u uređaju okreće brzinom 1440 okr/min. Abraziv prolazi (pada pomoću gravitacije) kroz sapnicu promjera 5 mm, udaljenost sapnice od uzorka je 3 mm.

Vrijeme ispitivanja je određeno na 13 minuta i 53 sekunde, što odgovara broju od 20 000 ciklusa, tj. okretaja uređaja.

Ispitni uzorci su dimenzija od otprilike 17x17x17 mm i pričvršćeni su pomoću vijaka na držač uzoraka. Držač uzoraka pričvršćen je na osovinu uređaja i rotira se brzinom od 1440 okr/min pa je brzina vrtnje uzorka:

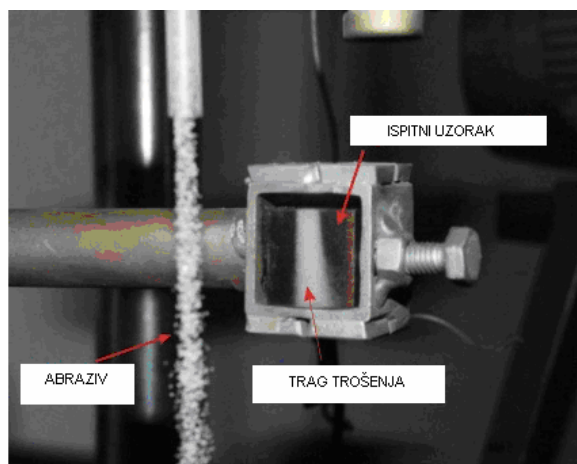
$$v_u = \frac{D\pi n_{okr}}{60} = 24,265 \text{ m/s} \quad (3)$$

Gdje je: D - promjer na kojem su pričvršćeni uzorci ($D=322$ mm)

n_{okr} - broj okretaja osovine (držača), okr/min

v_u - brzina vrtnje uzorka, [m/s]

Na slici 42. prikazan je držač uzoraka, sam ispitivani uzorak i sapnica iz koje curi abraziv.



Slika 42. Unutrašnjost uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju

Prema tome ispitni uzorci će udarati u abrazivne čestice brzinom 24,265 m/s. Nakon završetka ispitivanja (erodiranja) svake stranice na pojedinom uzorku, isti su vagani na vagi, slika 43.

Stupanj erozije se određuje mjerenjem gubitka mase prilikom vaganja nakon erozije svake stranice na pojedinom uzorku. Gubitak mase, tj. razlika u masi ispitnog uzorka prije i poslije, mjerena je pomoću vage METLLER B5C 1000, rezolucije 0,0001g. Na ovaj način određena je otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva u ovisnosti o vrsti, veličini i kutu upada abraziva.



Slika 43. Vaga METLLER B5C 1000

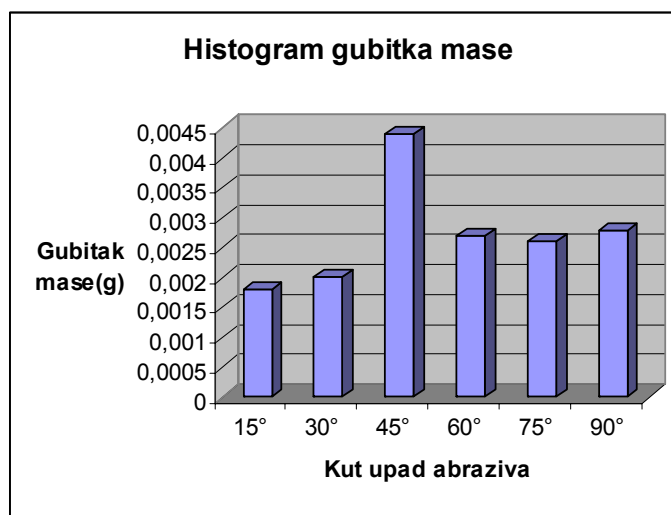
5.6.2 Rezultati ispitivanja trošenja erozijom

Prvo su ispitivani uzorci A, B, i C. Abraziv, tj. čestice erozije korištene za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje ovih uzoraka bio je kvarcni pijesak OTAWA 50/70. U tablici 3. navedeni su rezultati provedenih ispitivanja, tj. gubitak mase pojedinog uzorka ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska).

Tablica 3. Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska)

Oznaka uzorka	Početna masa, [g]	Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva Δm , [g]						
		15°	30°	45°	60°	75°	90°	Ukupno Δm , [g]
A	37,6281	0,0023	0,0017	0,0034	0,0025	0,0021	0,002	0,014
B	33,9469	0,0018	0,0025	0,003	0,0024	0,0026	0,0029	0,0152
C	37,5720	0,0014	0,002	0,0069	0,0033	0,0032	0,0035	0,0185
Srednja vrijednost		0,0018	0,0020	0,0044	0,0027	0,0026	0,0028	0,0157

Na slici 44. prikazan je dijagram promjene, tj. gubitka mase uslijed erozijskog trošenja uzorka izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva kvarcnim pijeskom OTAWA 50/70 pri različitim kutovima upada abraziva.



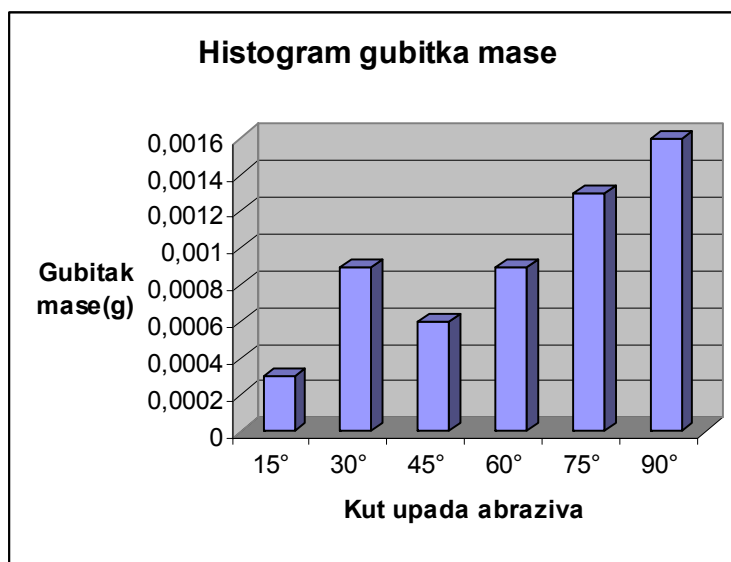
Slika 44. Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (kvarcnog pjeska).

Ispitivani uzorci D,E i F su erodirani pomoću čelične sačme promjera 700 μm (sitne sačme). U tablici 4. navedeni su rezultati provedenih ispitivanja, tj. gubitak mase pojedinog uzorka ovisno o kutu upada abraziva.

Tablica 4.Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)

Oznaka uzorka	Početna masa, [g]	Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva Δm , [g]						
		15°	30°	45°	60°	75°	90°	Ukupno Δm , [g]
D	34,4764	0,0003	0,0008	0,0009	0,0012	0,0016	0,0016	0,0064
E	36,4169	0,0002	0,0017	0,0003	0,0009	0,0013	0,0015	0,0059
F	35,0153	0,0005	0,0003	0,0006	0,0007	0,0012	0,0019	0,0052
Srednja vrijednost		0,0003	0,0009	0,0006	0,0009	0,0013	0,0016	0,0056

Na slici 45. prikazan je dijagram promjene, tj. gubitka mase uslijed erozijskog trošenja uzorka izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva sačmom promjera 700 μm , tj. sitnijom sačmom pri različitim kutovima upada abraziva.



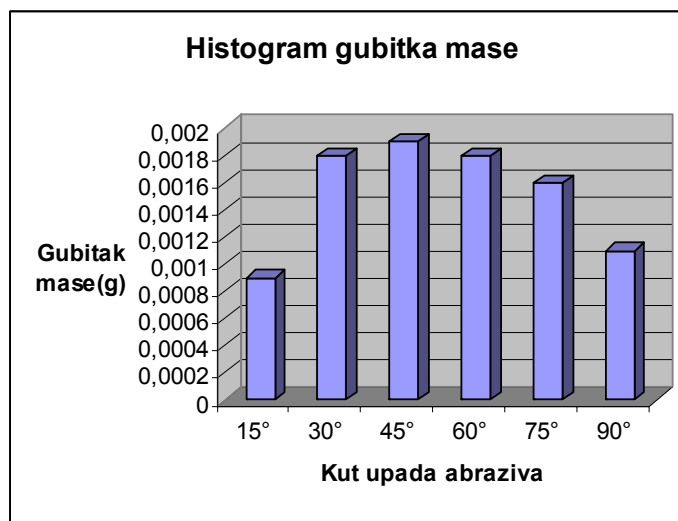
Slika 45. Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (sitne sačme)

Uzorci G, H i I su ispitivani na otpornost na eroziju česticama pomoću sačme promjera 1100 μm (krupnija sačma). U tablici 5. navedeni su rezultati provedenih ispitivanja, tj. gubitak mase pojedinog uzorka ovisno o kutu upada abraziva.

Tablica 5. Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)

Oznaka uzorka	Početna masa, [g]	Gubitak mase ovisno o kutu upada abraziva Δm , [g]						
		15°	30°	45°	60°	75°	90°	Ukupno Δm , [g]
I	38,1658	0,0007	0,0013	0,0022	0,0012	0,0014	0,0015	0,0083
H	35,8661	0,0008	0,002	0,0009	0,0013	0,0017	0,0003	0,007
G	37,9465	0,0013	0,0023	0,0027	0,0029	0,0019	0,0016	0,0127
Srednja vrijednost		0,0009	0,0018	0,0019	0,0018	0,0016	0,0011	0,0085

Na slici 46. prikazan je dijagram promjene, tj. gubitka mase uslijed erozijskog trošenja uzorka izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva sačmom promjera 1100 μm , tj. krupnijom sačmom pri različitim kutevima upada abraziva.



Slika 46. Histogram gubitka mase ovisno o kutu upada abraziva (krupne sačme)

5.6.3 Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje

Iz tablice 3. i histograma na slici 44 vidi se da je izotermički poboljšani te naknadno sačmareni nodularni lijev najmanje otporan na eroziju česticama od kvarcnog pijeska, tj. oštrim česticama pri kutu upada od 45° . Uzorak se pokazao najotpornijim, tj. imao je najmanji gubitak mase pri kutu upada čestica od 30°

Iz tablice 4. i histograma na slici 45 vidi se da je izotermički poboljšani te naknadno sačmareni nodularni lijev najmanje otporan na eroziju česticama od sitne sačme pri kutu upada od 90° . Uzorak se pokazao najotpornijim, tj. imao je najmanji gubitak mase pri kutu upada čestica od 15°

Iz tablice 5, i histograma na slici 46 vidi se da je gubitak mase, tj. erozijsko trošenje izotermički poboljšanog te naknadno sačmarenog nodularnog lijeva krupnijim okruglim abrazivom, tj. sačmom promjera $1100\ \mu\text{m}$ najveće pri upadu abraziva pod kutem 45° , dok je najbolja otpornost trošenju izmjerena pri kutu upada abraziva od 15° .

Ukupno trošenje uzoraka kvarcnim pijeskom iznosi u prosjeku $0,0157\ \text{g}$, dok je trošenje sitnijom sačmom po uzorku iznosilo $0,0056$ ili krupnom sačmom $0,0085\ \text{g}$. Gledajući ukupan gubitak mase, tj. intenzitet, a samim time i otpornost na erozijsko trošenje neovisno o kutu upada abraziva, primjećuje se da je izotermički poboljšani nodularni lijev manje otporan na erozijsko trošenje kvarcnim pijeskom, tj. manjim, ali oštrim česticama nego na eroziju sačmom.

6. Zaključak

Izotermičko poboljšavanje nodularnog lijeva spada u skupinu postupaka kojima se mijenja struktura cijelog volumena, a provodi se u cilju povišenja mehaničkih svojstava odljevaka (čvrstoće, istezljivosti, žilavosti, dinamičke izdržljivosti itd.).

Izotermičkim poboljšavanjem postižu se znatno bolja svojstva kako u odnosu na lijevano tako i u odnosu na klasično poboljšano stanje. Dok je čvrstoća uobičajenih nodularnih lijevova od 400 do 800 N/mm², čvrstoća izotermički poboljšanog nodularnog lijeva može doseći 1400 N/mm². Unatoč tako visokoj čvrstoći, izotermički poboljšani nodularni lijev ima razmjerno visoke vrijednosti istezljivosti, dinamičke izdržljivosti i žilavosti. Zato se ovaj materijal danas često upotrebljava u industriji motora, motornih vozila, poljoprivrednih i građevinskih strojeva. Također se koristi kao zamjena za čelične otkovke, odljevke, dijelove od valjanih profila. Primjenom izotermički poboljšanog nodularnog lijeva ostvaruju se značajne uštede.

Otpornost na erozijsko trošenje izotermički poboljšanog naknadno sačmarenog nodularnog lijeva ovisi o kutu upada čestica i vrsti abraziva.

Gledajući ukupan gubitak mase, tj. intenzitet, a samim time i otpornost na erozijsko trošenje neovisno o kutu upada abraziva, primjećuje se da je izotermički poboljšani nodularni lijev manje otporan na erozijsko trošenje kvarcnim pjeskom, tj. manjim ali oštrim česticama nego na eroziju sačmom.

7. Literatura

- [1] Solid particle erosion and mechanical damage
<http://www.solidparticleerosionandmechanicaldamage>
- [2] <http://www.encotech.com/docs/SolidParticleErosionandMechanicalDamage.pdf>
- [3] M. Novosel, D. Krumes; Željezni materijali : (metalografske osnove i tehnička primjena željeznih ljevova), Zagreb 1997.
- [4] Rs metali d.o.o. www.rsmetali.hr/nodularni_ljev.htm
- [5] L.C. Chang, I.C. Hsui, L.H. Chen, T.S. Lui : Effects of heat treatment on the erosion behavior of austempered ductile irons, Wear 260 (2006) 783–793
- [6] F. Unkić, F. Cajner, M. Krivohlavek, Istraživanje svojstava konvencionalnog i izotermički poboljšanog žilavog lijeva, METALURGIJA 33(1994) 1, 35-42
- [7] R.C. Voigt, „Austempered ductile iron – processing and properties“, Cast Metals 2(1989)2, 71-93
- [8] M.O. Speidel, „Bruchzähigkeit und Ermüdungs-Risswachstum von Gusseisen“, Werkstofftechnik 12(1981), 387-402
- [9] J. Race, L. Scott, „Practical experience in the austempering of ductile iron“, Heat treatment of metals 1994.4, 105-109
- [10] B. Liščić, I. Katavić, „Izotermički poboljšani žilavi ljev i njegova primjena za visoko opterećene elemente“, Ljevarstvo 32(1985)3, 51-68
- [11] Ph.D.Roko Markovina;The shot-peening process control in the high-speed vessels production),University of Split
- [12] Conference on Materials,Processes,Friction and Wear MATRIB'01 Vela Luka, 20-22,06,2001;Utvrdjivanje strukturnih promjena pri hladnoj deformaciji nodularnog lijeva
- [13] http://www.vorax.hr/dokumenti/mjer_tvr_hr.html
- [14] Modificiranje površine izotermički poboljšanog nodularnog lijeva;Vinko Ivušić
<http://zprojekti.mzos.hr>